The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ホーニング砥石の切削性能向上に関する研究
Author(s)	上田, 隆司
Citation	大阪大学, 1978, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/919
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

ホーニング砥石の切削性能向上に関する研究

昭和53年1月

上　田　隆　司

目　　次

使用記号 V

第1章　序　章 …… 1
1.1.　はじめに …… 1
1.1.1.　ホーニング加工 …… 1
1.1.2.　ホーニング原理 …… 1
1.1.3.　ホーニング砥石 …… 3
1.2.　処理砥石に関する従来の研究と問題点 …… 4
1.3.　研究目的と研究方法 …… 5
参考文献 …… 7

第2章　いおうの最適含浸条件 …… 10
2.1.　はじめに …… 10
2.2.　実験材料の特性値 …… 10
2.3.　多孔質体中の液体の流れ …… 10
2.3.1.　理論式の導出 …… 10
2.3.2.　理論式の妥当性 …… 13
2.4.　砥石中の溶融いおうの流れへの適用 …… 15
2.4.1.　砥石粒度を変化させた場合 …… 15
2.4.2.　溶融温度を変化させた場合 …… 16
2.4.3.　いおう充塡に要する時間 …… 16
2.5.　初期加熱温度について …… 17
2.6.　本章の結論 …… 18
参考文献 …… 19

第３章　処理砥石の切削性能 …… 21
3. 1.　はじめに …… 21
3. 2.　実験方法 …… 22
3. 3.　臨界圧力について …… 24
3. 3. 1.　臨界圧力前後における切削状態の違い …… 24
3. 3. 2.　臨界圧力の決定方法 …… 25
3. 4.　充塡方法の異なるいおう処理砥石の切削性能 …… 26
3. 4. 1.　溶融充塡法と溶液充塡法 …… 26
3. 4. 2.　いおうの充塡率が切削性能に及ぼす影響 …… 28
3. 5.　砥石結合度および粒度が切削性能に及ぼす影響 …… 29
3. 5. 1.　砥石結合度が及ぼす影響 …… 29
3. 5. 2.　砥石粒度が及ぼす影響 …… 30
3. 6.　種々の処理剤を充塡した砥石の切削性能 …… 32
3. 6. 1.　実験した処理砥石 …… 32
3. 6. 2.　処理砥石の切削性能の比較と処理剤の働き …… 33
(i)　S50Cの場合 …… 36
(ii)　SS41の場合 …… 36
(iii)　鋳鉄の場合 …… 37
3. 6. 3.　レジン処理とその充塡率の影響 …… 37
3. 6. 4.　いおうの潤滑効果についての一考察 …… 38
3. 7.　いおう処理砥石の切削性能劣化について …… 39
3. 8.　本章の結論 …… 40
参考文献 …… 42

第４章　処理剤の働きについて …… 43
4. 1.　はじめに …… 43
4. 2.　実験方法 …… 43

4. 2. 1.　供試砥石 …… 43
4. 2. 2.　曲げ試験および引張試験 …… 44
4. 2. 3.　引っかき強さの測定方法 …… 45
4. 2. 4.　目づまり量の測定方法 …… 45
4. 2. 5.　熱伝導率の測定方法 …… 47
4. 3.　常温における処理剤の補強効果 …… 48
4. 3. 1.　処理砥石の機械的性質 …… 48
4. 3. 2.　引張状態におけるいおうの補強機構 …… 49
4. 4.　切削状態における処理剤の補強機構について …… 51
4. 4. 1.　引っかき強さの温度による変化 …… 51
4. 4. 2.　引っかきに対する補強機構 …… 52
4. 5.　処理剤の目づまり抑制効果 …… 53
4. 5. 1.　処理砥石の目づまり量と目づまりによる砥粒補強 …… 53
4. 5. 2.　目づまり量と仕上面あらさの関係 …… 54
4. 6.　処理砥石の熱伝導率 …… 55
4. 7.　本章の結論 …… 57
参考文献 …… 58

第5章　固体潤滑剤添加による処理砥石の性能向上 …… 60
5. 1.　はじめに …… 60
5. 2.　研究方法 …… 60
5. 2. 1.　使用した固体潤滑剤の物性 …… 60
5. 2. 2.　使用砥石および処理方法 …… 62
(i)　レジン処理 …… 62
(ii)　黒鉛を添加したいおう処理 …… 63
5. 2. 3.　実験方法 …… 64
5. 3.　レジンベース処理砥石の性能 …… 64

5. 3. 1.　黒鉛添加による切削性能の変化 …… 64
5. 3. 2.　MoS_2，テフロン，フッ化黒鉛添加による切削性能の変化 …… 66
5. 3. 3.　加工油に黒鉛，MoS_2 を添加した場合との比較 …… 69
5. 4.　いおう処理砥石の改善 …… 69
5. 5.　本章の結論 …… 70
参考文献 …… 72

第 6 章　針状砥粒の切削性能の検討とその利用 …… 73
6. 1.　はじめに …… 73
6. 2.　使用した砥粒および砥石と実験方法 …… 73
6. 3.　加工進行に伴う切削状態の変化 …… 74
6. 4.　臨界圧力に及ぼす影響と加工条件による特性の改善 …… 76
6. 5.　破砕性質の特徴 …… 76
6. 6.　針状砥粒の活用法の検討 …… 79
6. 6. 1.　アルミニウム加工への応用 …… 79
6. 6. 2.　砥石のいおう処理による破砕性の改善 …… 81
6. 6. 3.　オーステナイト系ステンレス鋼の加工への応用 …… 82
6. 7.　本章の結論 …… 83
参考文献 …… 84

第 7 章　総　括 …… 85

謝　辞 …… 89

使　用　記　号

a …… オーバラン (mm)

A …… 鉱油

C …… 硫化脂肪油

d …… 毛細管の内径 (cm)，加工物径 (mm)

d_g …… 標準試料の厚み (cm)

d_s …… 砥石厚み (cm)

D …… 砥粒平均径 (cm)

$\triangle D$ …… 仕上量 (切削量) (mm^3)

F …… 毛管力 (g)，ステアリン酸処理砥石

F′ …… 粘性抵抗 (g)

F_n …… 砥石押付け力 (kg)，引っかき強さ法線分力 (kg)

F_t …… 切削抵抗接線分力 (kg)，引っかき強さ接線分力 (kg)

g …… 重力加速度 (cm/sec^2)

G …… 仕上比 ($=\triangle D/\triangle S$)

h_0 …… 液面の上昇限界高さ ($=4\sigma\cdot\cos\alpha/\gamma d$) (cm)

$\triangle h$ …… 切込み深さ (μm)

K …… 植物性ワックス処理砥石

l …… 加工物長さ (mm)

l′ …… 砥石長さ (mm)

L …… 切削距離 (m)

M.P. …… 融点 (°C)

N …… 無処理砥石

N1～N4 …… 結合度が異なる無処理砥石

No …… 加工油に浸した無処理砥石

P …… パラフィン処理砥石

P_c	砥石臨界圧力（kg／cm²）
P（Cl）	塩素化パラフィン処理砥石
P_n	砥石圧力（kg／cm²）
R，R－1～R－7	レジン処理砥石
R_a	仕上面あらさ（μm）
R(C)3～R(C)6	黒鉛添加のレジン処理砥石
R(CF)1～R(CF)5	フッ化黒鉛添加のレジン処理砥石
Re	レイノルズ数
R_g	粒状砥石
R_g(S)	いおう処理した粒状砥石
RH	ロックウエルH硬度
R(Mo)3～R(Mo)6	二硫化モリブデン添加のレジン処理砥石
R（T）3～R(T)5	テフロン添加のレジン処理砥石
S	毛細管の断面積（$=\pi d^2/4$）(cm²)，いおう処理砥石
S	ストローク（mm）
$\triangle S$	砥石損耗量（mm³）
S1～S4	結合度の異なるいおう処理砥石
S(C)1～S(C)3	黒鉛添加のいおう処理砥石
S_g	針状砥石
S_g(S)	いおう処理した針状砥石
So	加工油に浸したいおう処理砥石
S(T)	充塡率の低いいおう処理砥石
$S(T)_H$	加熱したS(T)砥石
t	時間（sec）
T	充塡に要する時間（sec）
v	流速（cm／sec）
V	引っかき速度（mm／min）

$\overline{V}$ …… 切削速度 (m／min)

V_0, V_1, V_2 …… 熱電対の出力 (mV)

V_B …… 結合剤率 (%)

V_G …… 砥粒率 (%)

V_P, V_P' …… 充塡前後の気孔率 (%)

V_s …… 砥石往復速度 (m／min)

V_w …… 加工物周速度 (m／min)

w …… 目づまり量 (mg／cm^2)

W …… 砥石粒度 (JIS)

y …… 液面の上昇高さ (cm)

Y …… 砥石の高さ，または含浸深さ (cm)

α …… 多孔質体（砥石）に対する液体のぬれ角 (deg)

α_1, α_2 …… $\triangle\dot{S}-P_n$ 直線の傾き (deg)

γ …… 比重量 (g／cm^3)

ε …… 歪

θ …… ガラスに対するぬれ角 (deg)，き裂の方位 (deg)

θ …… 交さ角 (deg)

λ_B …… 結合剤の熱伝導率 (cal／cm・sec・°C)

λ_s …… 標準試料の熱伝導率 (cal／cm・sec・°C)

λ_G …… 砥粒の熱伝導率 (cal／cm・sec・°C)

λ_P …… 気孔中の物質の熱伝導率 (cal／cm・sec・°C)

λ_S …… 砥石の熱伝導率

μ …… 粘性係数 (g・sec／cm^2)

σ …… 表面張力 (g／cm)

第1章　序　　章

1.1. はじめに

1.1.1. ホーニング加工

ホーニング加工とは，棒状砥石と荒仕上された加工物との面接触状態を保ちながら，回転と往復運動を同時に与え，基準面をもたずに加工物の寸法・形状・表面の修正を能率的に行う精密加工法である。この加工法は，1924年にBarnes Drill Co.によって自動車用シリンダー内面を加工する方法として発表された。以来，中ぐり・リーマ仕上・内面研削を行った直穴の真円度・真直度・仕上面あらさを単一生産，連続自動生産の別なく経済的に能率よく改善できるため，急速に発達した。

ホーニング加工は除去能率の点では研削加工に及ばないが，次のような特徴をもっている。[1),2)]

(1) 形状精度が優れている。

(2) 加工による変質層が薄い。

(3) 相当広範囲の仕上面あらさを得ることができ，鏡面仕上も可能である。

(4) 仕上面が網目状となり，耐摩耗性と潤滑性がよい。

(5) 加工物を取り付けるとき，心出しが容易である。

(6) 砥石のドレスをほとんど必要としない。

(7) 大部分の機械は基準面をもたず，大量生産に対しては機械構造を極端に単純化できる。

などであり，平面円筒内外面，球面，特殊形状面などいずれも加工でき，加工形状の範囲が広い。更に最近では，電解ホーニング加工・超音波ホーニング加工なども発達してきた。

1.1.2. ホーニング原理[3)]

図1−1に内面ホーニング加工主要部の概略図を示す。円筒内面に面接触す

るように装着された数本の棒状砥石をもつホーニングヘッドに，回転運動と加工物全長にわたる軸方向の往復運動を同時に与えて仕上げる。従って，砥石の加工物に対する運動はねじ状となり，加工面には図1−2に示すようにクロスハッチが形成される。内面研削の仕上面では条痕が円周方向のみであり，内燃機関のシリンダーのような場合，条痕はピストン運動の方向と直角であるから摩耗しやすいが，このクロスハッチはピストン運動の方向とある角度をなすため機械的に強く，さらに潤滑油の浸透も良好である。

クロスハッチのなす角 θ を交さ角と呼び，加工物周速度を V_w 砥石往復速度を V_s とすると，

$$\theta = 2\tan^{-1}(V_s / V_w)$$

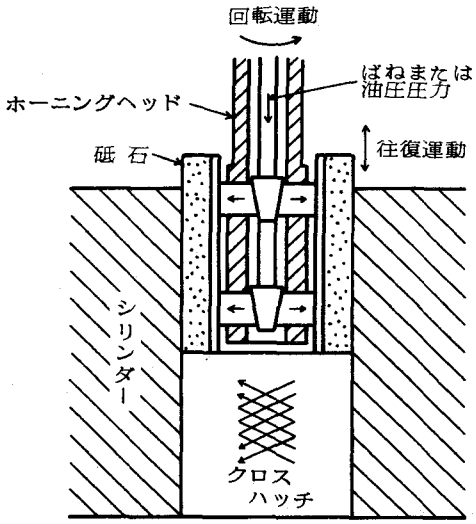


図1−1 内面ホーニング加工主要部の概略図

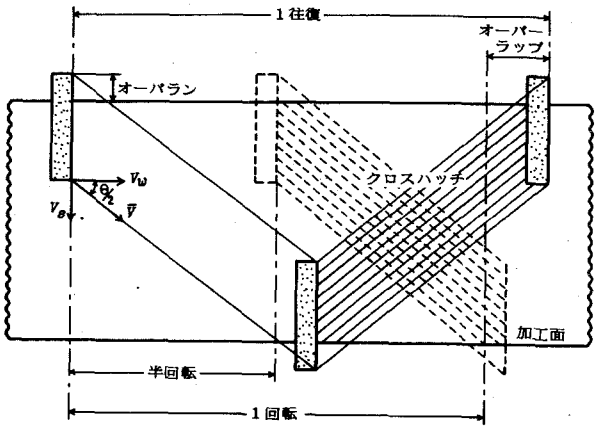


図1−2 クロスハッチの生成機構

となり，切削速度Vは

$$\bar{V} = \sqrt{V_s^2 + V_w^2}$$

となる。また，ホーニング加工の仕上精度を左右するものに加工物端における砥石のオーバランがある。オーバランとは加工物端での折返し時の砥石突き出し量で，内面ホーニングの場合，これが小であると穴は加工物端で細い樽形となり，大であると逆に加工物端で広い鼓形となり，真直の穴を得ることができない。適切な砥石寸法，オーバランは加工物の長さにより，経験的に次のように定めることができる。[1)]

(i) 長加工物（加工径d＜加工長さl）の場合

砥石長さ　$l' \fallingdotseq 1/2\ l$

オーバラン　$a \fallingdotseq 1/3\ l'$

(ii) 短加工物（$d \geqq l$）の場合

$l' \fallingdotseq (2/3 \sim 3/4)\ l$

$a \fallingdotseq (1/4 \sim 1/5)\ l'$

1.1.3. ホーニング砥石

ホーニング砥石は研削の場合と同様，鋳鉄や非鉄金属に対してはC系砥粒，鋼類に対してはA系砥粒が一般的に用いられ，結合剤としてはビトリファイドが多い。しかし，荒加工では＃120～180，中仕上では＃220～320，仕上加工では＃400～600と研削砥石よりはるかに細粒であり，結合度もやや軟質である。[3)]

ところが，最近，油圧シリンダーの大型化，長尺化が進み，ホーニング加工における切削除去量も大量となり，これに伴い砥石の消耗量が非常に多くなって，次のような問題が生じてきた。[4),5)]

(1) 砥石経費が高くつく。

(2) 砥石交換が頻繁となり，加工能率が低下する。

(3) 加工油に大量の脱落砥粒が混入するため，加工油の寿命が短かくなる。

これらの問題を解決するため，長寿命の砥石が望まれ，ダイヤモンドやボラゾン砥石の検討が行われているが，特に工具コスト，あらさ，およびコストに見合う生産量において問題がある。そこで，いおう，樹脂，固体潤滑剤などを砥石気孔中に充塡した処理砥石の使用が有効な対応策の1つとなっている。

1.2. 処理砥石に関する従来の研究と問題点

ビトリファイド砥石気孔中にいおうや固体潤滑剤を物理的に充塡したものが処理砥石であり，気孔中で固化している処理剤が切れ刃の潤滑作用を行うほか目づまりを防止して切削性能を向上させる。[6]

これまで，主として研削砥石用の処理剤の選択・開発に関して幾つかの研究が行われた。それによれば処理剤として具備すべき性質は，1）潤滑性のあること，2）常温では固体であるが，研削熱によって融解するものであること，3）切りくずと付着しにくいこと，4）安定であること，5）処理しやすいこと，である。研削砥石用処理剤としては，砥石損耗量・研削温度・目づまり量の減少に著しい効果を示すステアリン酸がよく，[7] また研削量が増し，砥石損耗量が減り，砥石研削面あらさの向上する，ステアリン酸とオレイン酸の混合物にステアリン酸鉛を加えたもの[8),9)]などもよいといわれている。このほか，グラファイトも用いられ，超硬合金や特殊合金鋼の乾式研削で発熱が少なく，高い研削比を得ている。[10),11)] 一方，処理剤に関連して，グラファイトを用いたビトリファイドボンド（VGボンド）のダイヤモンド砥石や，[12)~14)] フェノール樹脂に比べて耐熱性，耐摩耗性，潤滑性のよいポリイミド樹脂[15)~20)]を結合剤として用いたダイヤモンド砥石も開発されている。

超仕上やホーニング加工に使用する精密仕上砥石でも，いおうとかワックス処理したものが用いられており，特に，いおう処理砥石は無処理砥石に比べて砥石損耗量が少なく，研削比が大きく，仕上面あらさも優れ，格段の切

削性能を示す。[21)22)] しかし，ホーニング加工では研削加工に比べて，気孔に入った切りくずや破砕砥粒の排出は作業面積が広く切削速度が低いため困難な状態にあり，また砥石接触面温度が低いため，適当な処理剤とか，その貢献機構は必ずしも研削加工の場合とは一致しない。しかも，精密仕上では実際面におけるこのような大きな効果にもかかわらず，その貢献機構についての説明がほとんど推測にとどまっている。[23)] また，いおうの使用は処理砥石の製造，廃油処理に関する公害を伴う。さらに，加工油として推奨される軽粘度油は火災の危険性があるほか，いおうを溶出するので砥石性能の劣化も問題になる（3.7節参照）。このため，いおう代替品への切換えも主張されている。いおうの働きの解明は代替品の発見の手掛りにもなる。

1.3. 研究目的と研究方法

そこで本研究は，ホーニング砥石の切削性能向上を目的として，いおう処理砥石のほか種々の特徴ある処理剤を充填した砥石，および砥粒形状が異なる砥石を用いて，ホーニング加工をはじめ数々の実験を行い，以下の順に従って研究を進める。なお，ホーニング加工は一本の砥石を用いて，円筒外面を仕上げる簡単な方法によることにした。

(1) 優れた切削性能を得るための切削条件を調べる。

(2) 処理剤，特にいおうの切削性能への貢献機構について検討する。

(3) (2) で考えられた貢献機構を明確にすることによって，処理剤として具備すべき性質について考える。

(4) これに基づいて，いおうに代わる優秀な処理剤をみいだす。

(5) 砥粒形状が切削性能に及ぼす影響について検討する。

第2章では，これまで経験的に行われてきたいおうの充填方法を見直してみる。一般に，いおう処理は加熱砥石をいおう融液中に浸漬して毛管作用で砥石気孔中に充填するので，気孔を毛細管とみなす等価モデルを考え，管中

を上昇する液体の移動を与える式を導き出し，実験によってその妥当性を検討する。次に，この式をいおうの充塡に適用し，充塡に必要な時間，および最短時間で充塡できる処理温度をみいだす。また，適当な砥石加熱温度と，加熱を必要とする原因についても考察する。

第3章では，目的(1)，(2)を取り挙げ，ホーニング加工を行うことによって，処理砥石の切削性能を調べることにした。まず，切削性能の優れる加工条件，最適砥石，最適いおう充塡方法をみいだす。次に，この条件を基本にして，種々の特徴ある処理剤を充塡した砥石および充塡率を変化させた砥石の切削性能を比較し，いおうの貢献機構について考察する。また，切りくずのX線分析によって，いおうの極圧添加剤としての働きを明らかにする。さらに，加工油によるいおう流出に伴ういおう処理砥石の切削性能劣化についても触れてみる。なお，目的(2)については，まず貢献機構を

(a) 砥粒の補強

(b) 切れ刃摩擦面の潤滑

(c) 目づまりの抑制

(d) 冷却

と想定し，各処理砥石についてのそれぞれの相対的大きさを実験によって証拠だてる方法をとることにした。

第4章では，目的(3)に対して，数々の特徴ある実験を行うことにした。考えられる貢献機構のうち，まず(a)の砥粒補強については，砥石そのものに対する処理剤の補強効果を明らかにするため，処理砥石の曲げ試験，引張試験を行う。また，切削にあずかる砥石表面付近の砥粒に対する処理剤の補強効果については，切削状態にできるだけ近い状態を検討するため，砥石温度を上げた砥石表面の引っかき強さを測定する。次に，切削後の砥石作業面の目づまり量や引っかき強さを測定し，貢献機構(c)の目づまり抑制効果や無処理砥石の目づまりによる砥粒補強について調べる。さらに(d)の冷却効果に関しては，いおう処理砥石などの熱伝導率を測定し，モデルによる計算結果と比

較する。

第5章では，ホーニング用処理剤として具備すべき条件について考え，目的(4)について研究する。すなわち，補強効果のみ著しい合成樹脂に黒鉛，二硫化モリブデン，テフロン，フッ化黒鉛といった固体潤滑剤を添加した処理剤を作り出し，その添加の効果を調べると共に，この研究を通じて処理剤の潤滑効果（貢献機構の(b)）が切削性能に及ぼす影響も考察する。さらに，いおう処理砥石の切削性能と比較し，いおうの代替品について考えてみる。
また，黒鉛添加によるいおう処理砥石の改良も試みる。

第6章では，さらに砥石の性能向上を目的として，目的(5)を取り挙げる。まず，砥粒の形状が標準のものよりも細長くて鋭い切れ刃をもち，しかも破砕性に富んでいる，いわゆる針状砥粒を用いて加工し，その切削性能を調べる。ついで，この砥粒特性を活用する作業例として，目づまりに悩まされるアルミニウムやステンレス鋼といった難研削材への適用を考えてみる。

第7章では，本研究のまとめを行う。

参　考　文　献

1）　たとえば，精機学会編：精密工作便覧，コロナ社，8版（1970）699.

2）　たとえば，砥粒加工研究会編：砥粒加工技術便覧，日刊工業新聞社，（1965）869.

3）　たとえば，臼井英治：切削・研削加工学・下，共立出版，1版（1971）189.

4）　研井　堅：超仕上・ホーニング加工機の最近の動向と問題点，精機学会昭和50年度関西地方定期学術講演会前刷（1975）93.

5）　金井　準：油・空圧シリンダーのホーニング加工の最近の動向と問題点，同上，（1975）101.

6）　山本　明，鈴木音作：切削油剤とその効果，朝倉書店（1966）206.

7）　小林　昭，花岡忠昭：処理砥石の研削性能の判定法，精密機械，**31**,

4 (1965) 341.

8) 古市亮蔵，貴志浩三，中山　守：研削剤を含ませた研削といしの研削性について，日本機械学会論文集（第3部），**26**，166（1960）799.

9) R.Furuichi & M.Nakayama : On the Grinding Performances of Treated Wheels, Memoirs of the Faculty of Engg.Osaka City Univ., **7**, 12 (1965) 17.

10) 佐藤健児，松井正己：処理砥石について，マシナリー，5（1964）752.

11) Anon. : Eliminates Burning, Loading, Grinding and Finishing, 1 (1960) 41.

12) 熊谷直次郎：特許 No. 439200.

13) 吉永博俊：ダイヤモンド砥石が今後占める位置，機械技術，日刊工業新聞社，16, 1.

14) 今中　治：砥石の働きにおよぼす研削液もしくは研削雰囲気の効果，潤滑，**11**，11（1966）447.

15) R.L.Fusaro and H.E.Sliney : Lubricating Characteristics of Polyimide Bonded Graphite Fluoride and Polyimide Thin Films, ASLE Trans., **16**, 3 (1973) 189.

16) M.J.Devine and A.E.Kroll : Aromatic Polyimide Compositions for Solid Lubrication, Lub. Eng., **29**, 6 (1964) 225.

17) C.E.Sroog, A.L.Endrey, S.V.Abramo, C.E.Berr, W.M. Edwards and K.L.Olivier : Aromatic Polypyromellitimides from Aromatic Polyamic Acids, J. Polymer Sci. A3(1965) 1373.

18) G.R.Bower : What Engineers Should Know About Self-Lubricating Plastics, Metal Prog. **88**, 3 (1965) 106.

19) 佐賀二郎：鍛造・押出し用潤滑剤，塑性と加工，**17**，186（1976）613.

20) 旭ダイヤモンド工業K.K.: 旭ダイヤモンド技報, Vol. **02**, No. 05 (1976).

21) 松森 舜, 山本 明：超仕上砥石の仕上性能向上に関する研究（第1報）, 精密機械, **40**, 10（1974）852.

22) 同上（第2報）, 精密機械, **41**, 9（1975）884.

23) 岡井 弘：最近の研削砥石工業とその問題点, 窯業, **69**, 12（1961）474.

第2章　いおうの最適含浸条件[1),2)]

2.1. はじめに

いおうを砥石気孔中に充填するには，溶融いおうに加熱した砥石を浸し，毛管現象を利用していおうを吸い上げるのが一般的な方法である。いおうは融点119°Cを越えると粘性の小さなλいおうとなり，159°Cで粘性の大きなμいおうに変態するので，λの状態が充填に適しているが，そのわずかな粘度変化が充填量に影響を及ぼし，これがさらに切削性能に影響を与えるので（3.4.2節参照），処理温度は重要である。また，充填に当って，いおうに対するぬれの状態をよくするために，砥石を予め加熱しておくことも重要である。

本章では，この溶融いおう中に砥石を浸漬して，自然含浸させる手段を効果的に行う方法について検討した結果を述べる。すなわち，まず多孔質体において最も一般的に行われているように，気孔を円管にモデル化し，毛管力による多孔質体中のいおうの流れを考える。次に，数種類の粒度の砥石を用いて液体の上昇実験を行い，理論式の妥当性を検討すると共に，砥石粒度と円管径の関係を求める。さらに，任意の粒度の砥石にいおうを充填するのに必要な時間，および最短時間で充填できる溶融温度について検討する。また適当な砥石加熱温度と，加熱を必要とする原因についても考察を加える。

2.2. 実験材料の特性値

実験に使用した砥石を表2－1に，また図2－1にλいおうの粘性係数μ[3)]，表面張力σ[4)]，比重量γ[4)]の温度に対する変化を示す。

2.3. 多孔質体中の液体の流れ

2.3.1. 理論式の導出

多孔質体中の流体の移動速度を求める際，流路は気孔の大きさ，形状，配

表2−1　使用砥石

砥石粒度	気孔率(%)	砥粒径(μm)
WA 150	43.3	平均150.5
WA 600	46.7	26.0～31.0
WA 1200	48.9	11.5～14.5
WA 2000	47.8	7.1～ 8.9

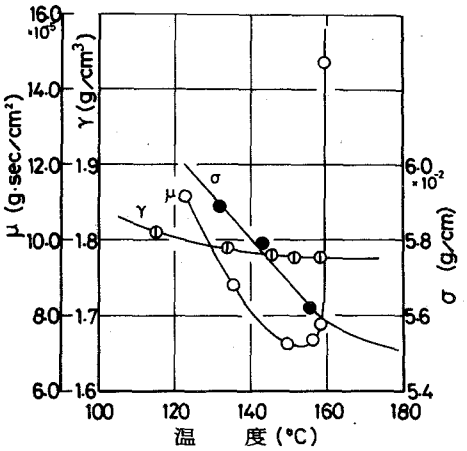


図2−1　いおうの物性値の温度による変化

列などが多種多様であるため非常に複雑であり，その正確な取り扱いは極めてむずかしい。そこで，多少問題点はあるにしても[5]気孔を毛細管にモデル化して考えるのが一般的な方法である。[6][7]例えばKrischerは毛細管の分布を考慮して解析を行っている。[8]この多孔質体内における液状水の移動には，物体内水分の濃度勾配もしくは含水率勾配によって起こる場合と，気孔が大きいときには毛管力，気孔が小さいときには滲透圧によって生ずるサクション・プレッシャの勾配によって起こる場合の2つがあるといわれている。[7]大谷らは気孔を，管径に分布をもたせた毛細管に置き換え，毛管力によるサクション・プレッシャ勾配を起動力として，定常状態の水分移動速度を求めている。[7]

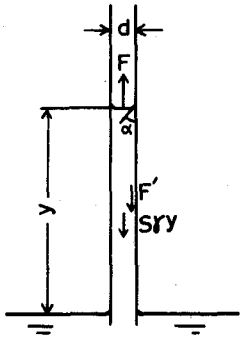
ビトリファイド砥石は比較的大きな気孔が全体積の40数%を占める多孔質体であるので，溶融いおうの気孔充塡に対しては，表面張力によって生ずる毛管力によると考えるのが妥当であろう。ここでは，最も簡単に砥石気孔を直管毛細管にモデル化し，毛管力を起動力として毛細管を上昇する液体の流れを表わす式を求めることにする。

砥石高さと同じ長さをもつ等価管径dの毛細管が気孔と同体積になるだけ

の本数存在し，管同志の横の連絡はないものとする。このうちの1本を取り上げ，この中を上昇してゆく液体の流れを解析する。

図2－2に示すように，液体に働く力は，上向きに表面張力による毛管力F，下向きに粘性抵抗F′，自重 $S\gamma y$，および慣性力である。そこで，毛細管を上昇する液体の運動方程式として次式が得られる。

$$S\frac{\gamma}{g}y\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)+S\frac{\gamma}{g}\left(\frac{dy}{dt}\right)^2+S\gamma y=F-F' \qquad (1)$$



溶融いおう

図2－2　気孔の毛細管モデル

後に示す実験結果図2－3より明らかなように，流れの加速度は小さく，短時間では定常流れとみなしうるし，流速も小さいので層流とみなしうる。例えば，$t \geqq 0.1$ 秒ではレイノルズ数が $Re \leqq 0.96$ である。そこで，ハーゲン・ポアズイユの法則が使え，粘性抵抗F′は

$$F'=S\cdot\frac{32\mu y}{d^2}\cdot\left(\frac{dy}{dt}\right) \qquad (2)$$

となる。一方，表面張力による毛管力Fは

$$F=S\gamma h_0=\pi d\sigma\cdot\cos\alpha \qquad (3)$$

ただし，h_0 は液面の上昇限界高さ

(2)，(3)式を(1)式に代入して整理すると，

$$\frac{\pi d^2}{4g}\gamma y\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)+\frac{\pi d^2}{4g}y\left(\frac{dy}{dt}\right)^2+8\pi\mu y\left(\frac{dy}{dt}\right)+\frac{\pi d^2}{4}\gamma y=\pi d\sigma\cdot\cos\alpha \qquad (4)$$

が得られる。この式は非線型であって，解を得ることは非常に難しい。しかし，dは非常に小さな値であり，また dy/dt，d^2y/dt^2 も小さいため，初めの2項を他の項に比べて小さいとして省略することにすると，上式は

$$8\pi\mu y\left(\frac{dy}{dt}\right)+\left(\frac{\pi d^2}{4}\gamma\right)y=\pi d\sigma\cdot\cos\alpha \qquad (5)$$

となる。これからtを求めると，t＝0でy＝0であるから，

$$t = \frac{32\mu}{d^2\gamma}\left[-y + h_0\left\{\ln h_0 - \ln(h_0 - y)\right\}\right] \tag{6}$$

形を簡単にするため，展開し，$y \ll h_0$に対して3次以上の微小項を省略して

$$t = \frac{4\mu}{d\sigma \cdot \cos\alpha} y^2 \tag{7}$$

が得られる。この式は運動方程式(5)において自重項を省略して解いた場合の解に一致する。すなわち，yが小さく自重項を省略してもよい場合にはこの式が使える。

Krischerや大谷らは屈曲係数を用いて多孔質体のじぐざぐした通路を補正しているが，[7),9)] ここでは，このような補正係数は用いず，dの大きさにその補正を含ませることにする。

2.3.2. 理論式の妥当性

上で得られた解の妥当性を確かめるために実験を行った。実験にはアセトン，エタノール，ベンゼン（いずれも25 °C），二硫化炭素（23 °C）を用い，これらの液中にWA150砥石（形状：25×10×250）を浸したとき，上昇してゆく液体の高さを砥石に印した目盛で読み取った。表2−2に供試液体

表2−2　供試液体の物性値

液体名	温度 (°C)	粘性係数 μ(g·sec/cm2)	表面張力 σ(10^{-2}g/cm)	比重量 γ(g/cm^3)	ぬれ角（対ガラス） θ（deg）
アセトン	25	3.14×10^{-6}	2.35	0.785	3
エタノール	25	1.12×10^{-5}	2.23	0.785	0
ベンゼン	25	6.17×10^{-6}	2.88	0.876	6
二硫化炭素	23	3.66×10^{-6}	3.26	1.259	10
いおう	145	7.55×10^{-5}	5.75	1.78	67*

*いおうのぬれ角の値がないため，ϕ50μmのガラス管を用いて測定した結果である。

の物性値を示す。[10]

図2−3は実験結果である。t＝100秒および1000秒におけるyの値を読み取り，これを(6)式に代入してdおよびαを決定した。その結果は表2−3のようで，dは液体によらずほぼ一定とみなすことができ，砥石で定まることがわかる。また，砥石に対するぬれ角αは液体によって定まる値であるが，便覧などによって簡単に得ることのできる，ガラスに対するぬれ角θ（表2−2参照）を用いて，実験的に次のように表わすことができる。

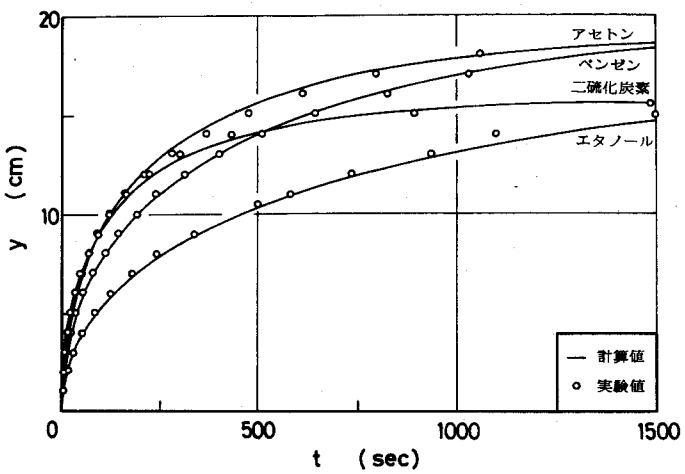


図2−3　砥石中の液体の上昇高さ

表2−3　実験によるdとαの値
（WA150）

液体名	等価管径 d（10^{-3}cm）	ぬれ角 α(deg)
アセトン	2.07	70.7
エタノール	2.05	69.4
ベンゼン	2.11	71.3
二硫化炭素	2.11	71.6

$$\alpha = 70 + \frac{\theta}{6} \tag{8}$$

(6)式にdおよび(8)式を代入して得られる結果は図2−3に計算値として実線で示してある。計算値と実験値のよい一致から，(6)式は砥石中の液体の上昇運動をほぼ正確に表わしていると考えてよいであろう。

2.4. 砥石中の溶融いおうの流れへの適用

2.4.1. 砥石粒度を変化させた場合

上述のように，dは同一粒度の砥石に対して一定値とみなしうる。そこでここでは，砥石粒度とdの関係を調べてみる。表2−1の砥石の気孔率は4つの砥石でやや異なっているが，これは毛細管の数に影響を与えるだけであると解釈することにする。寸法10×10×100（mm）の棒状砥石の一端を溶融いおう中に浸漬し，その上昇高さyを測定する。これは着色によっても容易にわかるが，重量変化から求めた。このyと表2−2の値を用いて(7)式からdを計算し，砥粒平均径Dで整理したのが図2−4である。図より，Dとdの間には次の関係が見い出せる。

$$d = 8.8\times10^{-2}\cdot D^{0.89} \quad (9)$$

一方，Dと砥石粒度Wの間には

$$D = 4.74\cdot W^{-1.15}$$

の関係があるので，(9)式は次のように書け，dはWにほぼ逆比例する。

$$d = 3.5\times10^{-1}\cdot W^{-1.02} \quad (10)$$

これによって，砥石粒度から等価管径dを求めることができる。ただし，気孔率が45％程度の砥石の場合である。

(7)式を使いやすくするた

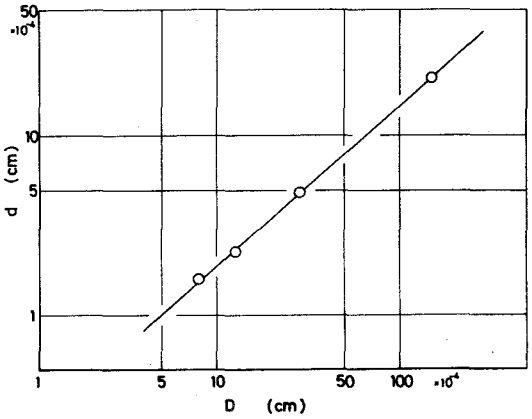


図2−4　砥粒平均径と等価管径の関係

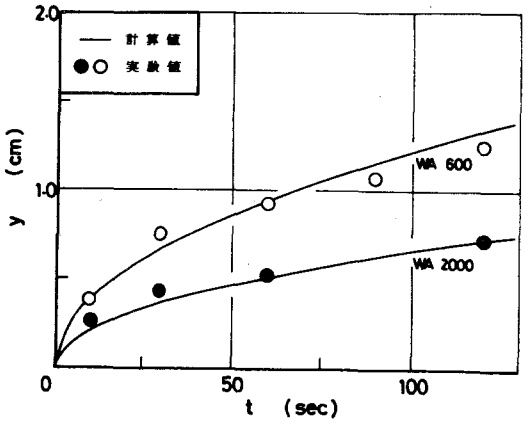


図2−5　砥石中のいおうの上昇高さ

めに，α と d を(8)式と(10)式を使って書きかえると

$$t = 1.14 \times 10 \cdot W^{1.02} \frac{\mu}{\sigma \cdot \cos(70 + \theta / 6)} \cdot y^2 \qquad (11)$$

図2−5 は表2−1 の WA 600 および 2000 の砥石に 145 °C の溶融いおうを充塡した結果であり，(11)式を用いて計算した結果を実線で示す。両者はほぼ一致している。

2. 4. 2. 溶融温度を変化させた場合

溶融いおうの物性値は温度によって図2−1 に示すように変化する。そこで，溶融温度の異なるいおうをWA150 砥石に 10 秒間充塡したときのいおうの上昇高さ y を調べて，図2−6 が得られた。ここで，$y \ll h_0$ であるので，(11)式に図2−1 の物性値を用いて計算した結果を実線で示す。ただし，θ は温度で変らないとしてある。実験結果と計算結果はかなり一致している。

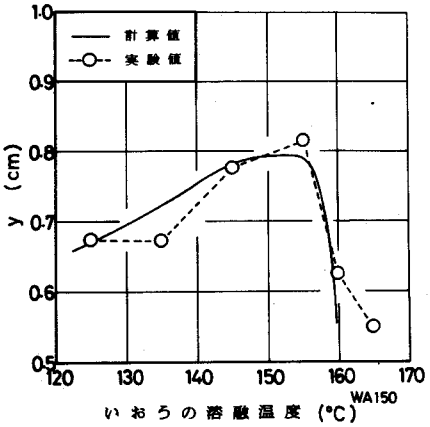


図 2−6　溶融温度を変化させた場合のいおうの上昇高さ（ t = 10 秒 ）

2. 4. 3. いおう充塡に要する時間

2. 4. 1.，2. 4. 2. 節では砥石表面を液面にわずかに浸して固定し，いおうの上昇高さを測定してきた。これに対し，いおうの上昇速さとほぼ同じ速さで砥石の充塡された部分を液中に沈めてゆくとき，短かい時間で砥石全体にいおうを充塡することができる。このとき，砥石中のいおうは液面からみれば静止しているから，(1)式の慣性項がなくなる。また，いおうの上昇高さは液面にあるので，自重項もなくなる。従って，(1)式における慣性項と自重項を省略した(7)式あるいは(11)式をそのまま用いることができる。

(11)式を用いて，高さYの砥石を充塡するのに必要な時間Tを求めよう。砥石をいおうの上昇速さと同じ速さでいおう液中へ沈めてゆくとき，

$$Y=\int_0^T \frac{dy}{dt}dt$$

となり，これに(11)式を代入してTを求めると

$$T=1.14\times 10\cdot W^{1.02}\times\frac{\mu}{\sigma\cdot\cos(70+\theta/6)}\cdot Y^2 \quad (12)$$

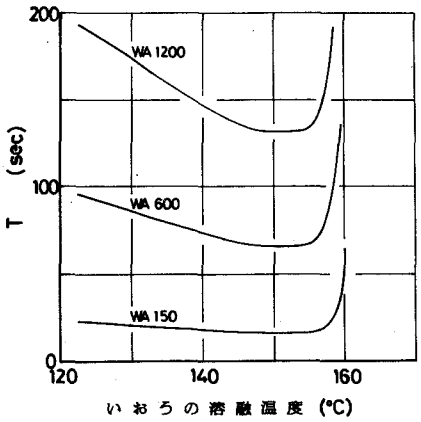


図2−7　高さY＝1 cmの砥石を充塡するのに要する時間

が得られる。試みに，高さY＝1 cm の砥石にいおうを充塡するのに要する時間Tを上式によって計算すると，図2−7のようになる。図にみるように，粒度が大きくなるにつれ，充塡時間が長くなると共に，いおうの溶融温度の影響が大きくなる。また，いおうの粘性が最も小さくなる150°C 付近で充塡すると非常に有利なことも明らかである。なお，(11)式や(12)式はいおう以外の処理剤に応用できることは勿論である。

2.5. 初期加熱温度について

いおうを砥石に充塡する際，空気中での冷却を考慮して砥石を〔いおうの溶融温度＋5°C〕に加熱して用いた。このとき，砥石を前もって150°C 以上の温度（初期加熱温度）に一定時間加熱した後，150°Cとしなければ充塡量が多くならなかった。

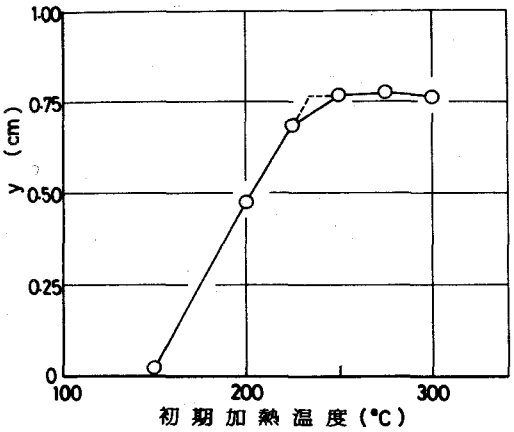
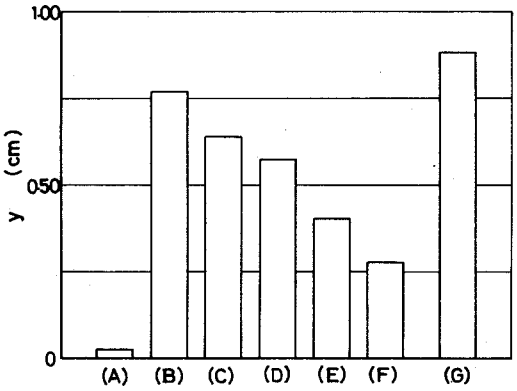


図2−8　初期加熱温度の影響

これはぬれが悪いためと考えることができる。すなわち，ぬれ角αが大きくなると，(3)式における液面の上昇限界高さ h_0 が小さくなるのである。図2－8はWA150砥石を初期加熱温度150°C～300°Cで1時間加熱した後150°Cとし，145°Cのいおうを10秒間充填したときの充填高さを測定したものである。図は250°C以上の加熱が有利なことを教えている。

焼成時すでに約1300°Cの高温に加熱されている砥石をこのように再び初期加熱しなければならない原因は，雰囲気（空気）からの吸着成分によるものと考えられる。[11] すなわち，ある成分の吸着によって砥石表面に対するいおうのぬれが悪くなるが，このよごれ膜は砥石を250°C以上に加熱するとき取り除かれ，ぬれがよくなると解釈できる。

このことをさらに確かめるため，250°Cで1時間初期加熱された砥石をある時間室温に放置し，その後150°Cに加熱して145°Cの溶融いおうを10秒間充填した際の上昇高さを調べてみた。この結果が図2−9で，空気中に長く放置するほど（(B)→(F)）上昇高さが低くなり，充填されにくくなっている。ところが，水中に保存した(G)の砥石では，(B)とほぼ同程度充填されており，空気を遮断した効果が現われている。これから，吸着成分は空気中に存在し，かつ，それが水ではないことがわかる。



記号	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
初期加熱温度(°C)	150	250	250	250	250	250	250
放置時間(週間)	0	0	1	2	4	6	6
雰囲気	—	—	空気	空気	空気	空気	水

図2−9　初期加熱後，処理までの保存状態を変化させたときのいおうの充填高さ

2.6. 本章の結論

ビトリファイド砥石の気孔を取り扱いの簡単な毛細管にモデル化し，毛管

力によって上昇する液体の運動を表わす一般式を求め，いおうの充塡に適用した。また，充塡速度を最大にする砥石の初期加熱温度についても検討した。その結果をまとめると次のようになる。

1） 砥石気孔中を毛管力によって上昇する液体の運動は(6)式によって表わされる。等価管径dは材料だけによってほぼ定まり，液体の種類によらない。

2） 任意の粒度の砥石（$V_p \fallingdotseq 45\%$）にいおうを充塡するのに必要な時間は(12)式で与えられる。計算結果によれば，いおうの粘性が最小となる150℃付近において，充塡に必要な時間は最小となる。

3） 砥石を250℃以上に初期加熱すると，充塡に必要な時間が短縮される。これは加熱によって砥石気孔に吸着している影響成分が除去され，いおうのぬれをよくするためと考えられる。

参 考 文 献

1） 山本　明，上田隆司：いおう含浸における砥石気孔の等価モデル，昭和52年度精機学会春季大会学術講演前刷，133.

2） 山本　明，上田隆司：いおう含浸における砥石気孔の等価モデルと最適含浸条件，精密機械投稿中.

3） C.C.Farr and D.B.Macleod : On the Viscosity of Sulphur, Roy.Soc., 97A(1920)80.

4） A.M.Kellas : The Determination of the Molecular Complexity of Liquid Sulphur, Journ. Chem. Soc., 113(1918)903.

5） 東島光雄：多孔体内流体流れ，機械の研究，**28**，3（1976）403.

6） Ali Belghith, Edmond－A.Brun : Caractéristiques d'un milieu poreux à grains identiques déduites d'une théorie statistique, C.R.Acad.Sc.Paris, **273**, 12(1971), Série A－1299.

7） 大谷茂盛，前田四郎：湿った粒状物質内における水分移動の機構，化学工学，**28**，5（1964）362.

8） O.Krischer，VDI，82（1938）373.

9） 若林嘉一郎：粒粉体層内液状水移動について(1)，粉体工学，4(1965) 1085.

10） たとえば，日本化学会編：化学便覧，基礎編Ⅱ，丸善（1975）573, 607, 667.

11） 森谷太郎，成瀬　省，功刀雅長，田代　仁編：ガラス工学ハンドブック，朝倉書店（1969）231.

第3章　処理砥石の切削性能[1)~3)]

3.1. はじめに

ホーニング加工や超仕上加工において，優れた砥石を選択する要件は次のようである。1）仕上量を多くするため，砥石臨界圧力が大きいこと（生産性），2）砥石損耗量が少なく仕上比（研削比に相当）が大きいこと（経済性），3）要求する仕上面性状が得られること（仕上面），であり，この点，いおう処理砥石は無処理砥石に比べて，砥石損耗が少なく，仕上比が大きく，仕上面も優れ，格段の切削性能を示す。気孔に充塡されたいおうの切削性能への貢献手段として次のものが考えられる。

(a) 砥粒の補強 ― 破砕・脱落を少なくする。これに伴い，作業進行と共に作用切れ刃数を増し，同時に砥粒切込み量が減少するので仕上面あらさも向上する。

(b) 潤滑効果 ― 気孔中での状態（固・液体）で異なるほか，切れ刃温度の高いときには極圧添加剤としても働く。

(c) 目づまり抑制効果 ― 切りくずの気孔へのはまり込み，および砥粒・結合剤への溶着防止。

(d) 冷却効果 ― 気孔充塡に伴う熱通路の拡大による放熱効果の改善，溶解と変態における熱吸収。

そこで本章では，ホーニング加工における処理砥石，特にいおう処理砥石の切削性能について調べ，処理剤の働きに検討を加える。まず，砥石臨界圧力を規定し，ここにおける切削性能を代表値として扱うことにすると共に，砥石の粒度や結合度がこれに及ぼす影響について検討を加える。次に，同一砥石について，処理剤の充塡状態を変化させた場合，また種々の特徴ある処理剤を充塡した場合について加工を行い，各処理砥石の切削性能を比較し，処理剤，特にいおうの貢献機構について考察する。さらに，いおう処理砥石のいおう溶出に伴う切削性能劣化についても検討する。

3.2. 実験方法

実験装置の概略図を図3−1，実験装置主要部外観を図3−2に示す。実験は一本の砥石で円筒外面を仕上げる簡単な方法によった。加工機械は主軸速度を無段に変化できる旋盤を改造したもので，砥石の加工物軸方向の往復運動，および砥石圧力の負荷は油圧機構によった。加工物は表3−1に示すものを用い，旋盤により平均あらさ R_a ＝ 4.5 〜6.5 μm に加工した。なお，鋳鉄は深さ方向にわたって硬度と組織の変化の少ない連続鋳造されたものであり，全炭素量は約3.5％，組織は緻密で細かく均一なグラファイト分布をもっている。砥石は研摩布＃120をはさんで，実験状態でドレスすることにより，加工物との接触状態をよくし，加工はじめの作業面の状態をほぼ一定にした。加工油は表3−2に示すAを常用した。これは60スピンドルとEスピンドルの混合油である。Cは硫化脂肪を含む極圧油で，いおうの極圧効果を考察する実験（3.6.4節）で使用した。供給量約200cc/min

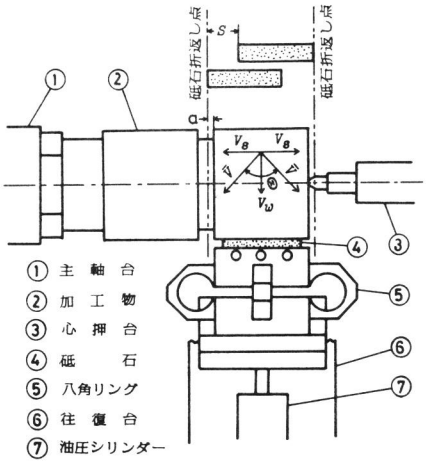


図3−1　実験装置の概略図

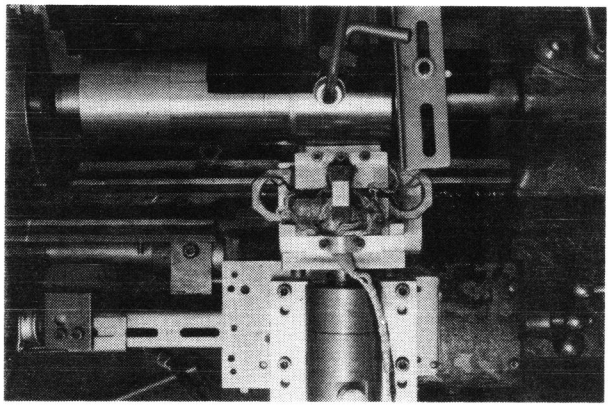


図3−2　実験装置主要部外観

はタンクヘッドで与えた。

実験条件を表3−3に示す。実験Ⅰは砥石圧力P_nを一定に保ち，切削進行に伴う切削状態の変化を追ったものである。一方，実験Ⅱ，ⅢではP_nを変化させて加工し，切削距離$L=90$mにおける切削性能を測定した。この切削距離Lは加工時間の経過に伴って仕上面あらさが向上し，それがほぼ頭打ちになる付近として設定してある。この実験によって砥石臨界圧力P_cを求めることができる。

測定量は砥石押付け力F_n，切削抵抗接線分力F_t，砥石損耗量$\triangle S$，仕上量$\triangle D$および仕上面あらさR_aである。F_nとF_tの測定は砥石ホルダー部分に装置した弾性八角リング（図3−1）に貼付した歪ゲージによって行い，ビジグラフに記録した。

表3−1　使用した加工物材料

加工物	材質	硬度H_V	形状(mm)
炭素鋼	S45C	196	ϕ(75~70)×60
	S50C	199	ϕ(70~65)×60
	SS41	144	ϕ(70~65)×60
鋳鉄	FC10	204	ϕ(70~65)×60

表3−2　加工油

特性値	A(鉱油)	C(硫化脂肪油)
粘度(30℃, cSt)	10.18	11.77
油脂分 (%)	0	8.5
いおう分 (%)	0	1.3
銅板腐食 100℃, 1h	1	2

表3−3　実験条件

実験条件	記号	実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ
加工物周速度	V_w m/min	8.2	8.2	17.5
砥石往復速度	V_s m/min	3.4	3.4	3.1
切削速度	$\overline{V}$ m/min	8.9	8.9	17.8
交さ角	θ deg	45	45	20
切削距離	L m	—	90	90
ストローク	S mm	30	30	30
オーバラン	a mm	10	10	10
砥石寸法	mm	10×10×50		

砥石損耗量はダイヤルゲージ（最小目盛1μm），仕上量（直径減量）は電気マイクロメータ（東京精密 DELTA MINICOM EMD－M30G），仕上面あらさは触針式表面あらさ計（東京精密 SURFCOM EMD－R75C カットオフ値 0.75mm）で測定した。

3.3. 臨界圧力について

3.3.1. 臨界圧力前後における切削状態の違い

ホーニング加工では，砥石圧力 P_n を変化させると，砥石臨界圧力 P_c を境にして切削状態が大きく変化する。

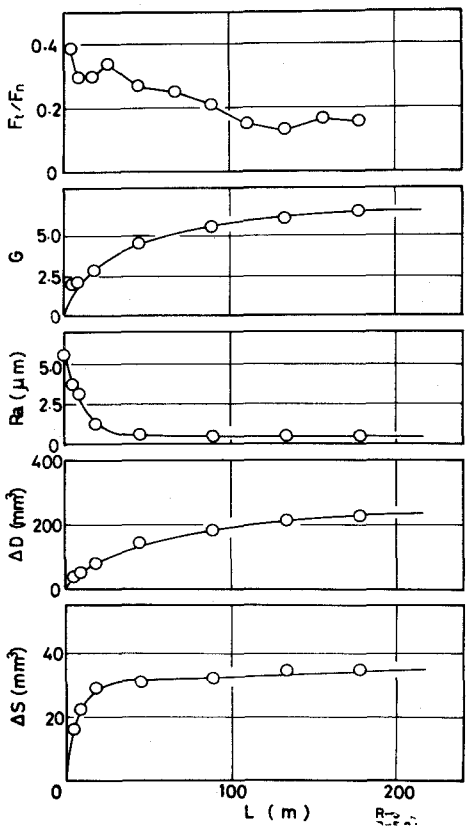


図3－3 $P_n < P_c$ における切削性能
（実験条件Ⅰ，R－3砥石（$P_c \fallingdotseq 7.5$ kg／cm²），S50C，$P_n = 5.8$ kg／cm²）

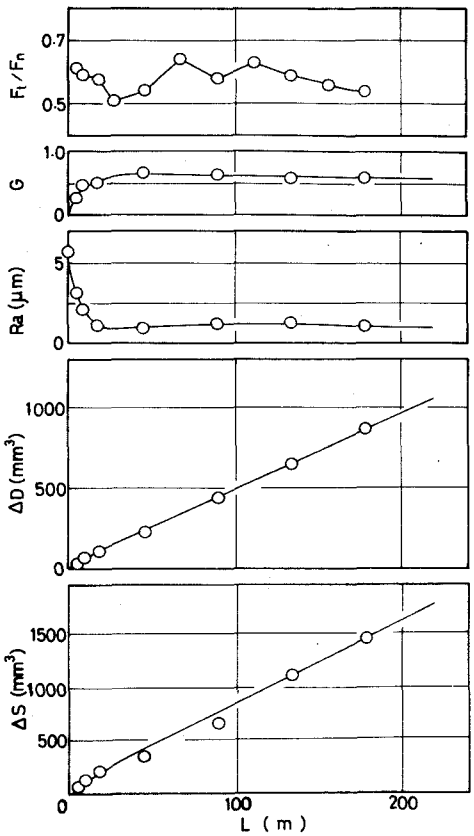


図3－4 $P_n > P_c$ における切削性能
（実験条件Ⅰ，R－1砥石（$P_c \fallingdotseq 3.0$ kg／cm²），S50C，$P_n = 4.1$ kg／cm²）

図3−3は P_n を P_c 以下，図3−4は P_n を P_c 以上に設定し，実験条件Ⅰのもとでレジン処理砥石（表3−9，3.6.1.節）を用いてS50Cを加工油Aで仕上げた場合の仕上経過で，L は切削距離である。砥石損耗量 $\triangle S$ と仕上量 $\triangle D$ を体積で与えた $G = \triangle D / \triangle S$ は仕上比である。

図3−3では P_n が P_c 以下であるため，$\triangle S$，$\triangle D$ は加工進行に伴い飽和する形をとる。F_t / F_n も次第に減少し，$L \fallingdotseq 100$ m以後では定常状態とみなせる。この時期では，砥石はほとんど切削を行わず，いわゆるみがき状態にあり，F_t の大部分をみがき作用における摩擦力が占めていると考えてよい。

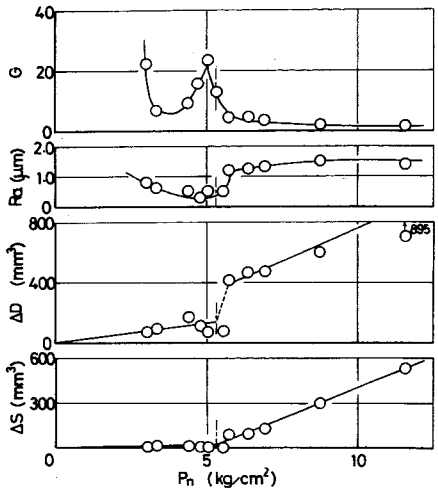
これに対し，図3−4では P_n が P_c 以上であるため，$\triangle S$，$\triangle D$ は直線的に増大している。F_t / F_n は全般的にはほぼ一定とみなすことができ，約0.6と図3−3の場合より高い値をとっている。これは，砥粒の破砕ないしは脱落がはげしく常に新しい切れ刃が存在し，砥石が常に切削状態にあるためである。このため $\triangle D$ は大きいが，$\triangle S$ も大きいので，図3−3に比べて G は低く，R_a も劣る。

いま，P_c をこの2つの切削状態の転移点と定めるとき，この値を切削条件設定の際の目安とすることができる。一般に，能率的な切削を目的とするときには，使用砥石における P_c のゆらぎに伴う性能のばらつきに対する安全性を考慮して，P_n を P_c に近いやや小さな値とするのが得策である。

3.3.2. 臨界圧力の決定方法

図3−5は砥石圧力 P_n を変化させ，実験条件Ⅱのもとで S50C をいおう処理S砥石（表3−9，3.6.1節）で加工した場合の切削性能である。臨界圧力 P_c は切れ刃の強さに関係しており，ここでは $\triangle S - P_n$ 曲線において P_c をはさむ両側の変化を直線近似し，この二直線の交点として P_c を定めた。ホーニング加工では，超仕上の場合と同様，仕上の進行が速いうえ，切削砥粒の挙動が確率的に定まるので，データのばらつきが大きい。そこで，P_c の決定には $\triangle D - P_n$ 曲線の変化も参考とした。いうまでもなく模型的に表現すれば

1個の砥粒に作用する力はP_c以下では砥粒を脱落させるほど大きくなく，切れ刃を小破砕更新するか摩耗させるのみであり，P_c以上の圧力ではあたかも砥石をドレスするように働き，大破砕と脱落を生じさせる。従って，P_cの大きさは砥石の結合度と切削性能の1つの表現であるといえる。



一点鎖線 ： P_c位置

図3−5　砥石臨界圧力
（実験条件Ⅱ，S50C，S砥石）

図3−5にみるように，P_c又はP_cに近いやや小さな値のところで，仕上面あらさR_aが最もよく，仕上比Gも極大値をとり，この圧力のところでもっとも優れた切削性能が得られている。従って，前節でも述べたように，一般の加工ではP_cにおける切削性能が目安となるため，各処理砥石の切削性能の比較にはこの圧力における値で行うことにする。

3.4. 充塡方法の異なるいおう処理砥石の切削性能

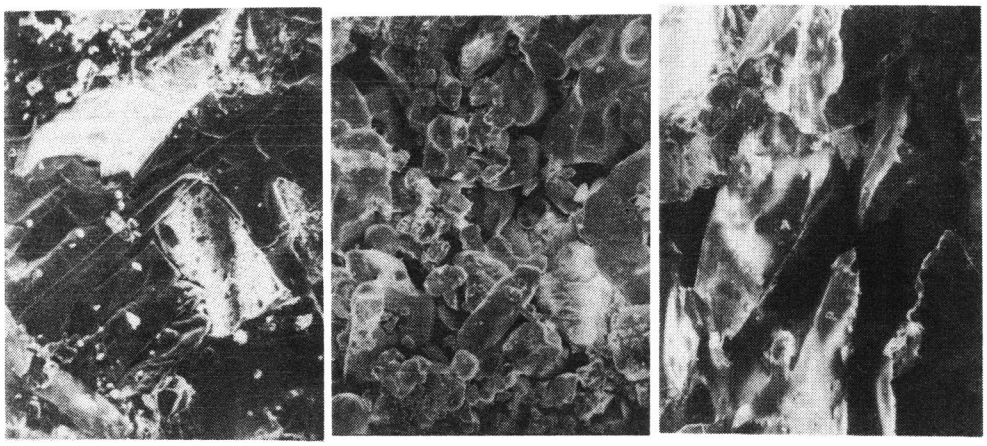
3.4.1. 溶融充塡法と溶液充塡法

いおうの充塡には2通りの方法がある。その1つは第2章で述べた溶融いおうを気孔に含浸させる方法であり，ここでは溶融充塡法と呼ぶことにする。この方法によるといおうは気孔中に多量に充塡され，表3−4のS砥石が得られる。ここで，RH硬度はロックウェルH硬度である。もう1つの方法は溶媒の二硫化炭素にいおうを飽和させ，

表3−4　いおう処理砥石の特性値（WA150J）

砥石記号	気孔率 V_P' (%)	充塡率 $1-V_P'/V_P$ (%)	RH硬度
S	7.0	83.8	108
S(T)	39.5	8.8	36

（$V_G=43.7\%$，$V_B=13.0\%$）



S 砥 石　　S(T) 砥 石　　$S(T)_H$ 砥 石

図3−6　いおうの充塡状態（写真の大きさ上下 200μm）

これに砥石を浸して毛管現象によって気孔中に含浸させた後，二硫化炭素を蒸発させるもので，ここでは溶液充塡法と呼ぶことにする。この方法によるといおうは少量しか充塡されず，表3−4に示すS(T) 砥石が得られる。現在のところこの2つの方法以外にいおう処理の方法はなく，S砥石とS(T) 砥石の中間の充塡率をもつ砥石を得ることができない。

S，S(T)両砥石の表面を走査電顕で観察し，いおうの充塡状態を調べたのが図3−6左図，中図である。S砥石ではいおうが気孔中に十分充塡され，樹枝状結晶がみられるが，S(T) 砥石ではいおうが細粒状となって砥粒や結合剤表面に付着しているだけで，補強効果を期待できない。そこでS(T) 砥石を150℃で1時間加熱することによって，粘度と表面張力低下を利用して気孔内壁をぬらしたものが $S(T)_H$ 砥石であり，図3−6中図の細粒状のいおうは消失している。

これらの砥石を用いて，S50Cを実験条件Ⅱのもとで加工し，P_c における切削性能をまとめたものが図3−7である。S(T) 砥石ではほぼ無処理N砥石と同程度の切削性能しか示しておらず，溶融充塡法で十分充塡したS砥石に比べて充塡した効果は少ない。これに対し，$S(T)_H$ 砥石では P_c と G にや

や改善効果がみられる。

3. 4. 2. いおうの充塡率が切削性能に及ぼす影響

第2章で述べたように，いおうの溶融温度が変われば粘性をはじめその物性値が変化するので，充塡率が変わる。そこで，温度を変えることによって充塡率の変化した砥石が得られる。表3−5にその砥石の特性値を示す。溶融温度の変化により充塡率は約10％程度変化しており，145℃で最大となっている。これは145℃を底として，いおうの粘性が大きいことなどが原因となって充塡されにくくなるためであり，図3−8にみるように砥石表面の所々に充塡されていない気孔（図で黒い部分）も存在する。従って，RH硬度もばらつき，値も小さくなっている。

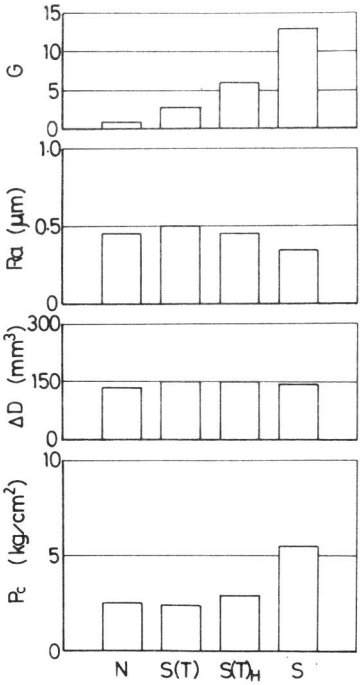
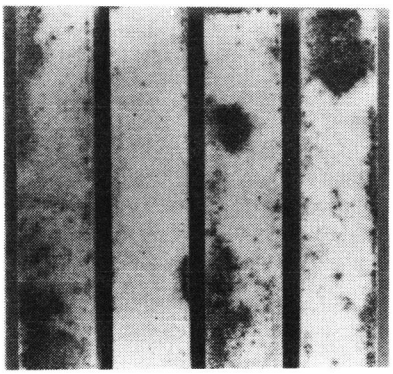


図3−7　いおうの充塡方法の影響
（実験条件Ⅱ，S50C）

表3−5　いおう処理砥石の特性値

いおうの溶融温度	気孔率 V_P'（％）	充塡率 $1-V_P'/V_P$（％）	RH硬度
135℃	12.0	72.3	98
145℃	7.0	83.8	108
155℃	10.8	75.1	102
160℃	10.3	76.2	93

（V_G ＝ 43.7％，V_B ＝13.0％）



135℃　145℃　155℃　160℃
いおうの溶融温度
図3−8　いおうの充塡むら

これらの砥石を用いて，実験条件Ⅱのもとで S 50 C を加工し，P_c における切削性能をまとめたものが図3−9 である。充塡率も合わせて示してある。充塡量の最も多い 145 °C の砥石において P_c や G が大きくなると共に R_a も小さくなり，優れた切削性能を示している。従って，切削性能の面からも，いおうの溶融温度は粘性が小さくなる 145 °C 付近が最適であることがわかる。

以上の結果より，以後，いおう処理 S 砥石は 145 °C で充塡することにした。

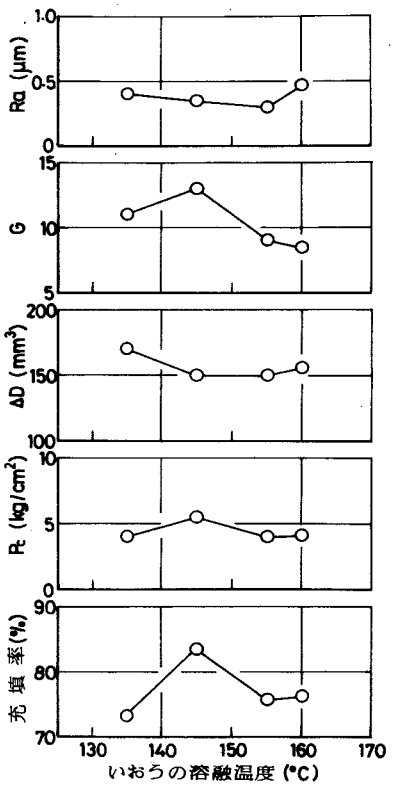


図 3−9　いおうの充塡率の影響
（実験条件Ⅱ，S 50 C）

3.5. 砥石結合度および粒度が切削性能に及ぼす影響

3. 5. 1. 砥石結合度が及ぼす影響

表3−6(a)に WA150 砥石の結合剤率 V_B をほぼ一定として，砥粒率 V_G を変化することによって結合度（RH 硬度）を変化させた砥石，および，同表(b)にこれをいおう処理した砥石の特性値を示す。処理前には RH 硬度で 70 もあった差がいおう処理後は大幅に縮まり，いずれもほぼ RH 硬度 100 程度となっている。

これらの砥石を用いて実験条件Ⅱのもとで S 50 C を加工したときの P_c における切削性能をまとめたものが図3−10 である。横軸には無処理状態での RH 硬度を取ってある。RH 硬度 60 程度までは，硬度が大きくなるに伴って無処理，いおう処理いずれの砥石においても P_c は大きくなっているが，切削量 $\triangle D$ はほぼ同じである。しかし，いおう処理によって $\triangle S$ が減少するので，

仕上比Gは著しく向上している。また，仕上面あらさR_aは軟らかい砥石に処理したものほど向上がみられる。これに対し，RH硬度80のN1，S1砥石になると，P_cが飛躍的に大きくなり，$\triangle D$やGが大きくなって生産性，経済性は大いに増すのであるが，R_aの悪化もひどく，砥石が硬過ぎるといえる。従って，砥石結合度にはその目的と切削条件に合った最適結合度が存在しており，この実験の加工条件で仕上面あらさを重視するときには，N3砥石（RH硬度35前後）が最適であると考えられる。また，同じRH硬度でも無処理と処理砥石ではその構成要素が異なるので，性能も大いに異なることもわかる。

3.5.2. 砥石粒度が及ぼす影響

表3−7に64A砥粒を用いて，#60〜#150まで粒度

表3−6

(a) 結合度を変化させた砥石の特性値（WA150）

砥石記号	組織（%） V_P	V_G	V_B	RH硬度
N1	37.4	51.4	11.2	80.0
N2	41.3	46.3	12.4	53.5
N3	43.3	43.7	13.0	35.7
N4.	46.2	42.8	11.0	9.0

(b) いおう処理砥石の特性値

砥石記号	気孔率 V_P'（%）	充塡率 $1-V_P'/V_P$(%)	RH硬度
S1	7.6	79.7	115.5
S2	7.0	83.0	109.3
S3	7.0	83.8	108.0
S4	9.5	79.3	102.5

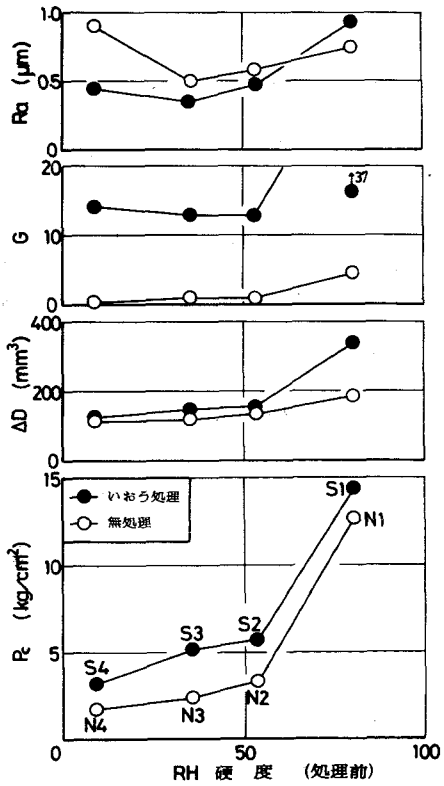


図3−10 砥石結合度が切削性能に及ぼす影響（実験条件Ⅱ，S50C）

を変化させて得た砥石の特性値を示す。64A砥粒とは，WA系砥粒を6，A系砥粒を4の割合で混合したものであり，砥石は結合度がいずれもほぼJとなるように組織を調節してある。

これらの砥石を用いて，実験条件Ⅲのもとで S45Cを加工したときの P_c における切削性能をまとめたものが図3−11である。横軸には粒度Wがとってある。粒径が小さくなるに伴って砥粒保持力が減少するため，P_c が小さくなると共に，$\triangle S$ が増し，G が減少する傾向にある。しかし，R_a が向上しており，粒径が小さくなれば仕上加工に適することがわかる。一方，いおう処理によって切削性能は大いに改善され，特に粒径が小さくなった場合の $\triangle S$ の減少は著しい。しかし，R_a に関しては無処理とほぼ同程度で，処理した効果がみられない。

表3−7　粒度の異なる砥石の特性値（64A）

粒度	組織（%）		
	V_P	V_G	V_B
60	36.3	51.8	11.9
80	39.1	49.7	11.2
100	42.3	46.7	11.0
150	42.4	46.8	10.8

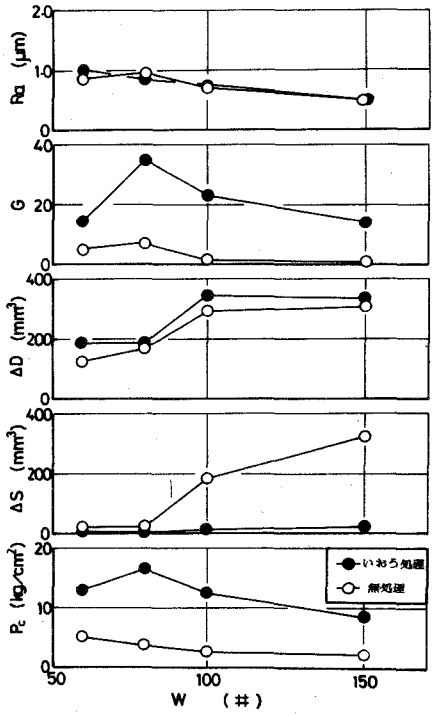


図3−11　砥石粒度が切削性能に及ぼす影響
（実験条件Ⅲ，S45C）

3.6. 種々の処理剤を充塡した砥石の切削性能

3.6.1. 実験した処理砥石

表3−8の砥石に表3−9に示すような処理剤を充塡した。以下，これらの砥石を表中の記号で略記する。RH硬度はドレス整形後の値である。

表3−8 供試砥石（無処理，記号N）

砥石	組織（%）			RH硬度
	V_P	V_G	V_B	
WA 150 J	43.3	43.7	13.0	35.7

表3−9 処理剤および処理砥石の特性値

処理剤	融点（概略値）（°C）	砥石記号	気孔率 V_P'（%）	充塡率 $1-V_P'/V_P$（%）	RH硬度
130パラフィン	55	P	7.2	83.4	60
ステアリン酸	70	F	9.2	78.7	73
植物性ワックス	85	K	13.1	69.8	82
塩素化パラフィン	94	P(Cl)	8.0	81.5	92
いおう	119	S	7.0	83.8	108
フェノール樹脂	(重合温度) 185	R−1	42.3	2.4	40
		R−3	39.6	8.7	56
		R−5	36.2	16.5	76
		R−7	34.5	22.7	84

含浸されたいおうは気孔内を裏張りして砥粒支持を強固にするが，それよりも融点が低く，硬さも軟らかいパラフィン・ステアリン酸・ワックス類では補強よりもむしろ潤滑効果・目づまり抑制効果が期待される。ノボラック型フェノール樹脂を用いたレジン処理砥石は試験的に補強のみを目的として用いた。表3−9には処理後の充塡率も示してある。

処理方法はレジンのほかはいおうと同様加熱溶融した処理剤の中へ砥石を浸し，毛管現象によって気孔中に入るだけ含浸させる方法をとった。

ステアリン酸と植物性ワックスは油性向上剤として，塩素化パラフィンは極圧添加剤としての効果をもつ。後者は塩素を70%含有させたものであり，固形パラフィンより融点が高い。低温では塩素の結合状態が比較的安定であるので，約105°Cで処理した。植物性ワックスはしゅろ類の葉から得られる密ろうに似たろうで融点が高く，またセロチン酸エステルを含んでいる。

レジン処理ではメチルアルコールを希釈剤として任意濃度のレジンを気孔中に充塡した後，加熱重合温度185°Cで硬化させた。[4] 気孔中のレジン量は表

3−9 に示す 4 種類である。光学顕微鏡によると，レジンは砥粒および結合剤を包み込むように充塡されている。

このほか，いおうと同属のセレンの効果を参考にしようとしたが，いわゆるぬれが悪いため充塡は困難であった。

次に，これらの砥石中の充塡状態を調べてみた。図3−12 は＃120 の研摩布を用いて砥石を表面から順次削り取って，深さ 3mm までの RH硬度分布を測定し，図に付記した表面値との比をとったものである。レジン処理を除いて，硬度むらの程度は処理によって改善される。特に，S 砥石では硬度がほぼ均一化する。硬度むらは一般に砥石の密度むらに原因するのであるが，処理剤が気孔を埋めたことによって密度むらが改善されるのである。これに対し，レジン処理砥石は濃度が高いものほど表面硬度が高く，内部に向って傾斜をもっている。これはレジンが高分子であるため，溶液の濃度が高いときには粘性が大きく，浸入しにくいことによる。一般に溶融充塡法による処理では，充塡むらを避けるために十分充塡するより方法がなく，充塡量を調節することは困難である。

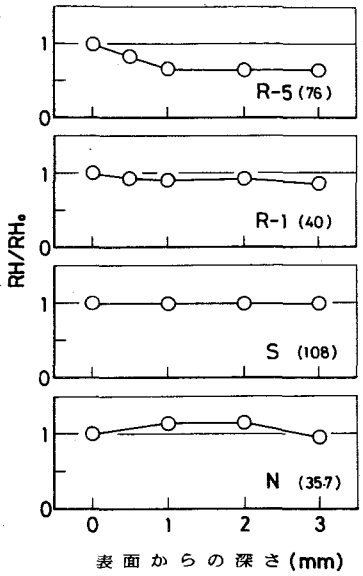
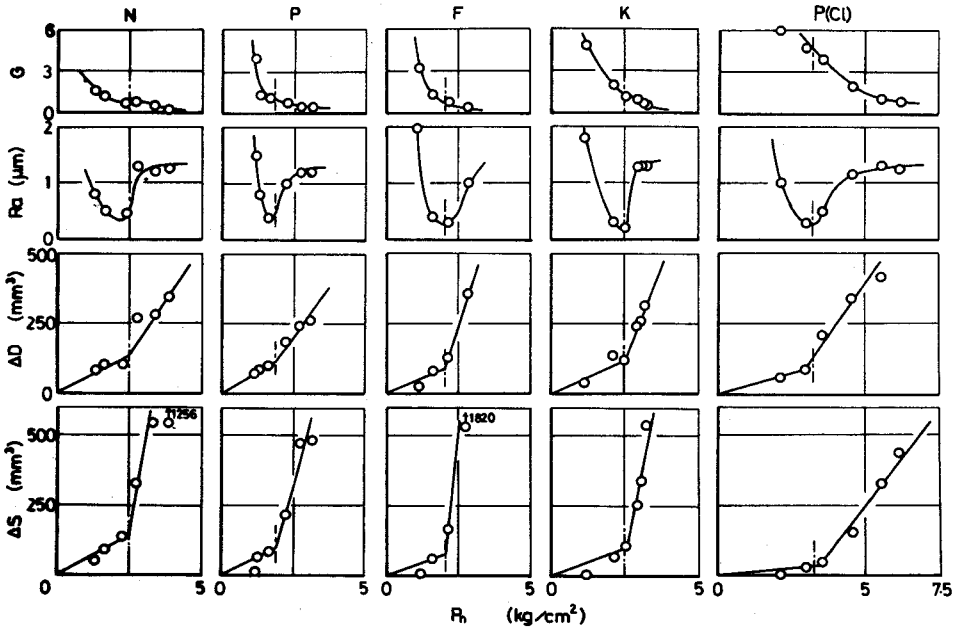


図 3−12　処理砥石の充塡むら
（（ ）内は砥石表面のRH硬度）

3. 6. 2.　処理砥石の切削性能の比較と処理剤の働き

表3−9 に示した種々の処理砥石を用いて，S 50 C，加工油 A を使用し，実験条件Ⅱのもとで加工した場合の切削性能を比較すると図3−13のようになる。図にみるように，砥石損耗量$\triangle S$，仕上量$\triangle D$，および P_c 付近に最小値をもつ仕上面あらさ R_a 曲線の様子はすべての砥石に共通していることがわかる。ただG 曲線には S，R 砥石のように P_c 付近に極大値をもつ場合と，P，F，K，



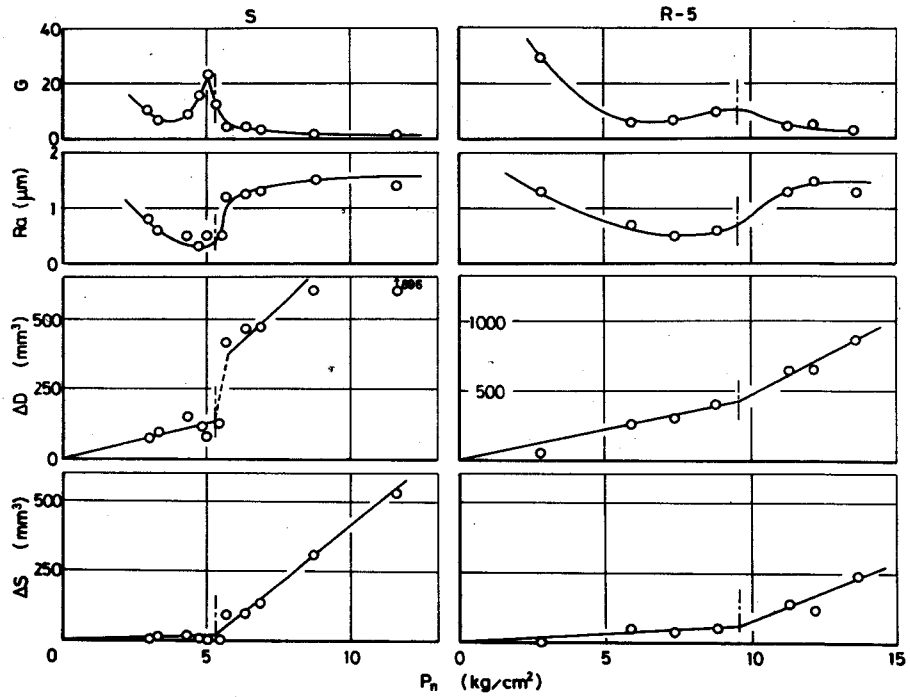


図3−13　種々の処理砥石の切削性能
（実験条件Ⅱ，S50C）

P(Cl) 砥石のようにもたぬ場合を生じた。これは処理剤の溶融状態に関係するようにも考えられ，図では明瞭ではないが，N砥石も一般に前者に属する。また，N，S 砥石の特性曲線の様子は超仕上の場合[5]と似ている。

図から得られる P_c における特性曲線上の値をまとめると図3−14 左図のようになる。優れた砥石と処理剤を選択する基準は P_c におけるこれらの値を扱って，

(a) 大きな$\triangle D$ を得るために P_c が高いこと（生産性）

(b) 砥石損耗率 $\triangle S/P_c$ が小さく，G が大きいこと（経済性）

(c) R_a が小さいこと（仕上面）

である。これらは超仕上の場合と同じである。[6] 図3−14 にはS 50 C のほか，SS41，鋳鉄を同じ条件で加工した場合の P_c における切削性能もまとめて

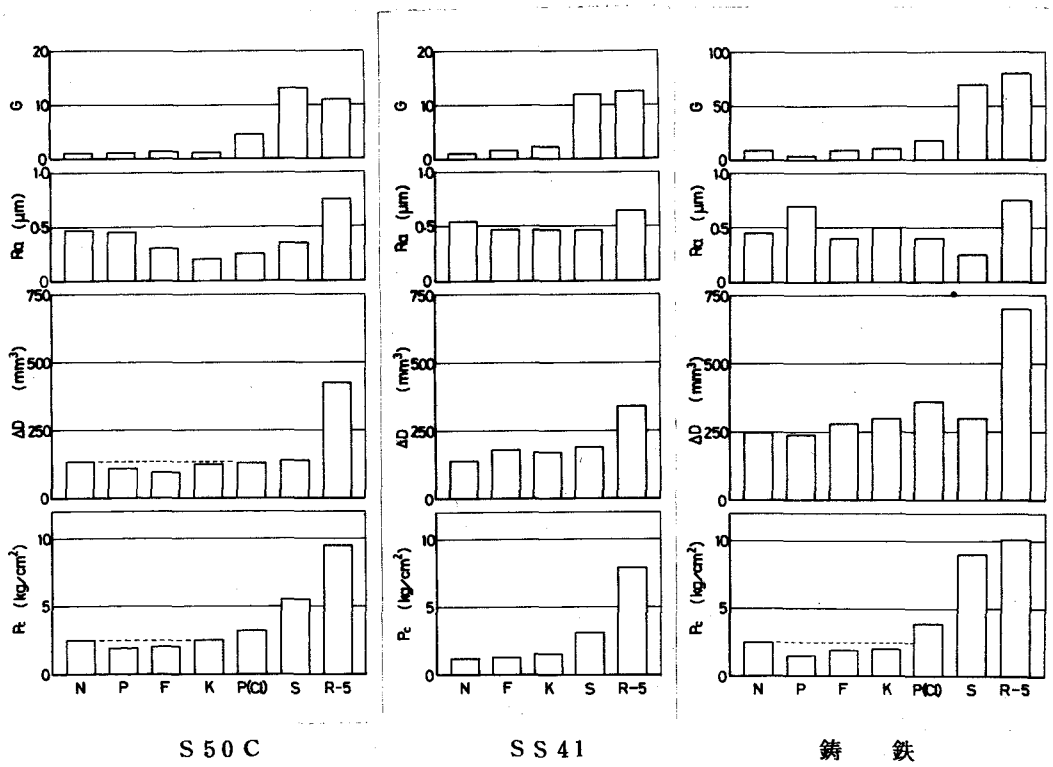


図 3−14 P_c における切削性能の比較

（実験条件Ⅱ）

ある。処理砥石は左から処理剤の融点が高くなる順に並べてある。

(i) S50Cの場合

一般に処理剤の融点の順にP_c, $\triangle D$, Gが大きくなるが, R_aはこの順に従わず，特別な潤滑性能をもつF，K，P(Cl)，S砥石で小さい。処理剤が補強効果をもつときP_cやGが大きくなるはずであるが，P，F，K砥石ではP_cやGがベースであるN砥石よりも小さくなっている。この傾向は鋳鉄の場合にも認められる。これは次のように考えられる。目づまり金属が気孔に押し込まれると切削砥粒は補強され，また真実接触面積も増す。これはN砥石のP_cを高くするように働く。一方，気孔中の処理剤は目づまり防止に役立つが作業面温度が高いと溶融または半溶融状態となり，潤滑には貢献するが，補強効果は失なわれる。このため，N砥石のP_cが高くなったと考えることができる。また，このように処理剤が融出したとするならば，砥石作業面平均温度はKの融点（85°C）以上，P(Cl)の融点（94℃）以下と考えられ，この条件下でS50Cを加工するときは90°C前後であろうと推定できる。これらを裏づける次の事柄がある。

(1) F砥石ではP_nが大きいとき，作業中，加工油の砥石後流に細い白線を引くことがあり，これが白い小さな薄片となって加工油タンクのフィルタに引っかかるが，時間が経つと溶けてなくなる。ステアリン酸の常温における加工油中への溶解度は4％以下であるから，部分的に濃度の高い融液が冷却によって析出したものであろう。

(2) 90°Cに加熱された各処理砥石の未使用表面の引っかき強さを測定したところ，N，P，F，K砥石はほぼ同じ大きさの値をもった。

(3) N砥石の場合のみ，加工時の砥石圧力P_nが低いほど，作業後の砥石作業面の目づまり量が増加すると共にその面のRH硬度および引っかき強さが作業前より上昇している。

以上の(2)(3)については4.4，4.5節で詳しく述べる。

(ii) SS41の場合

SS41はS50Cに比べて材質が軟らかいため$\triangle D$は増えるが，靱性が大きいため砥石も損耗しやすくなり，P_cが大きく減少すると共にR_aも悪化したと考えられる。また，$G-P_n$線図において，S50Cの場合図3−13にみるようにS砥石やR−5砥石ではGの極値がP_c付近に存在したが，SS41の場合，S砥石では極大値がなく，耐熱温度の高いR−5砥石のみに現われた。このことはこの場合，P_c付近でS砥石中のいおうの補強効果が減少することを示しており，砥石作業面平均温度がS50Cの場合よりも上昇していると考えることができる。

(iii) 鋳鉄の場合

S50Cの場合とほぼ同様の傾向を示しているが，$\triangle S$が少なく，$\triangle D$は図のように大きいので，GはS50Cより数倍も大きくなって加工性のよいことがわかる。また，K砥石のP_cがN砥石よりも小さくなっていることから，砥石作業面平均温度はS50Cよりも少し高くなっていると考えられる。

3.6.3. レジン処理とその充塡率の影響

表3−9に示した4種類の充塡率をもつ砥石でS50Cを加工した場合の切削性能を図3−15，図3−16に示す。充塡率が増すに伴って$\triangle S-P_n$曲線の傾きが小さくなると共に，P_cが大きくなり補強効果が増していることがわかる。また，これと共に$\triangle D$やGも大きくなっているが，充塡率をR−7砥石以上にしても目立った向上はなく，むしろ仕上面あらさR_aが悪化するため，充塡率は15%程度が適

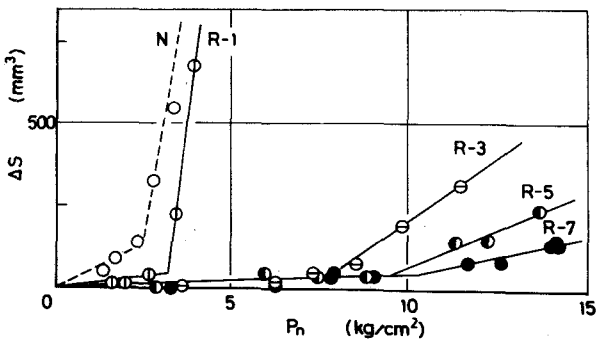


図3−15 レジン処理砥石の$\triangle S-P_n$曲線
（実験条件II，S50C）

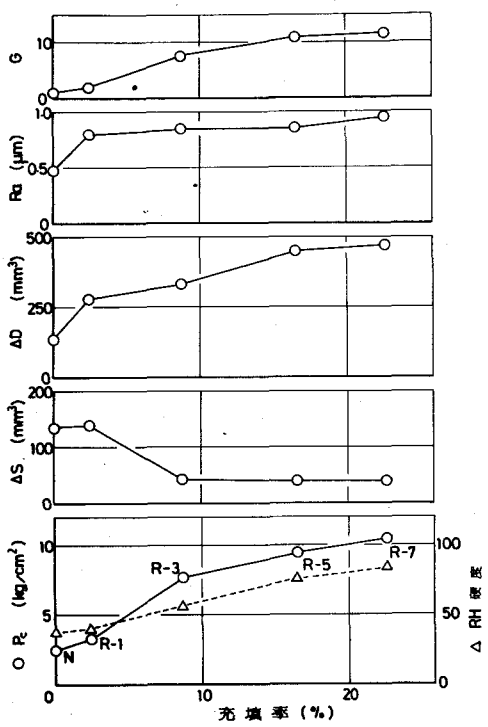


図3−16　レジン処理砥石の切削性能と充填率（実験条件Ⅱ，S50C）

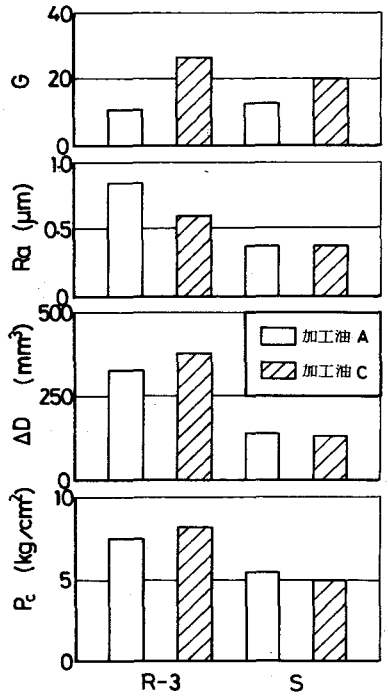


図3−17　いおうの潤滑効果（実験条件Ⅱ，S50C）

当であろう。図3−14でもみたように，他に比べて生産性と経済性が高いので荒仕上加工に適している。

3. 6. 4　いおうの潤滑効果についての一考察

SおよびR−3砥石に硫化脂肪油C（表3−2）を用いたときの効果を鉱油Aの場合と比較すると図3−17のようである。S砥石ではG値の向上が目立つ程度であるが，R−3砥石に対してはかなり効果をもち，生産性（$\triangle D$），経済性（G），仕上面あらさ（R_a）を向上させる。これから，気孔中のいおうが活性の程度は異なるが極圧添加剤と同様な働きをしていると受け取れる。切りくずについてのX線マイクロディフラクトメータによる分析結果による

と，S砥石にA油を使用したとき，微弱ではあるが FeS の存在が認められた。作業面平均温度に比べ，刃先温度（flash temp.）は十分高いことがわかる。もちろん，N砥石にC油を使用した場合には，これよりもやや強いFeSのラインがみられた。

3.7. いおう処理砥石の切削性能劣化について

一本の砥石を繰り返し使用する連続切削では，加工油によって気孔中のいおうが溶出し，砥石性能の劣化が起こる。図3−18に示すように無処理砥石（N2砥石，表3−6参照）では，加工物を換えるごとに加工の初期において前加工あらさでセルフ・ドレスされ，ある程度目づまりが取り除かれて砥石の切れ味は回復するが，次第に目づまり量が増えてゆく[7]。この結果砥粒は目づまりで補強され，砥石損耗量 $\triangle S$ が減少して切れ刃更新が悪くなり，切削量 $\triangle D$ は減少してゆく。これに対し図3−19に示すようにいおう処理砥石（S2砥石）では，気孔中のいおうの機械的もち去りと，加工油による消失が起こり，この結果 $\triangle S$ が次第に増加する傾向を示し，仕上比 G は減少してゆく。繰り返し数を多くすれば当然いおうの消失量が多くなり，$\triangle S$ が増し，P_c が減少して無処理砥石に近い切削性能を示すようになると考えられる。

そこで，気孔中のいおうを強制的に取り除いた砥石を用いて，その切削性能の変化に検討を加えてみた。まず，いおうの溶出を早めるため，いおう処理S砥石を100°Cに加熱した灯油に2時間浸し，いおう砥石表面から約0.5mm程度の深さまで取り除いた。この砥石を用いて，実験条件Ⅱのもとで S50Cを加工したときの切削性能を図3−20に示す。これより，砥石表面のいおうが溶出した部分ではN砥石の性能を示しているが，砥石が損耗して，いおうが溶出しなかった部分になると砥石が損耗しにくくなり，いおうが再び補強効果を示すことがわかる。しかし，P_c はS砥石よりも小さくなっている。

このように切削性能が劣化することは，最適切削条件が時間と共に変化す

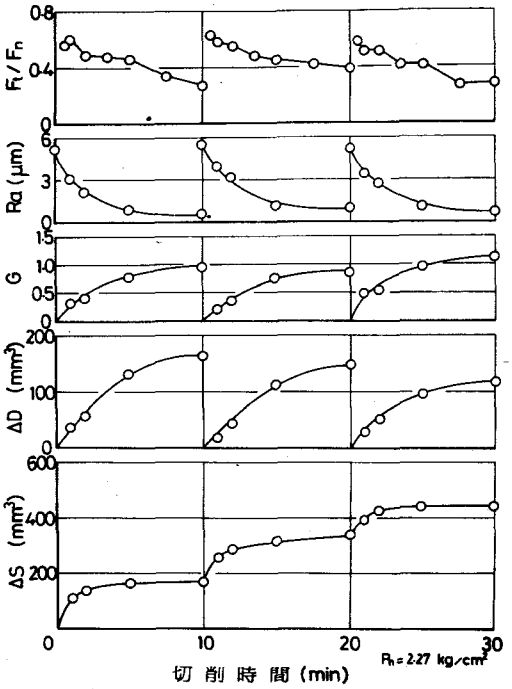


図3−18　無処理砥石を用いた連続切削
（実験条件Ⅰ，S50C）

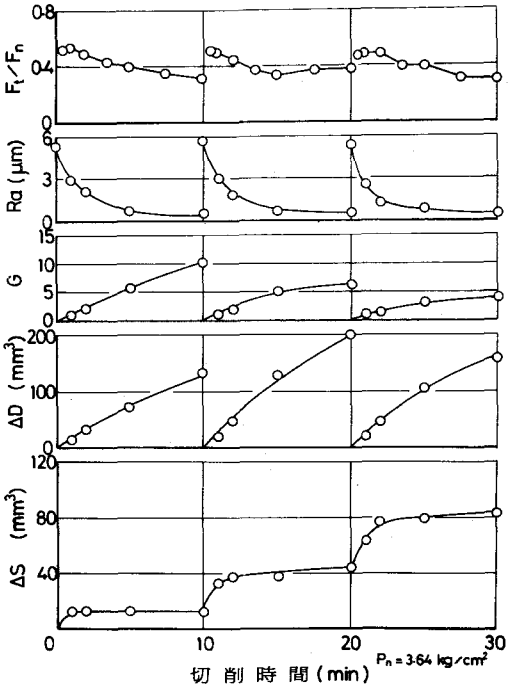


図3−19　いおう処理砥石を用いた連続切削（実験条件Ⅰ，S50C）

ることを意味しており，一定条件のもとでいおう処理砥石を用いる際，この点に十分注意を払わねば安定した切削状態を得ることができないわけである。

3.8. 本章の結論

組織の異なる砥石，および基準砥石にいおうのほか，種々の特徴をもつ処理剤を充填した砥石を用いてホーニング加工し，その切削性能を比較検討すると共に，処理剤の働きにも検討を加えた。その結果をまとめると次のようになる。

1）　一般の加工では，砥石圧力を臨

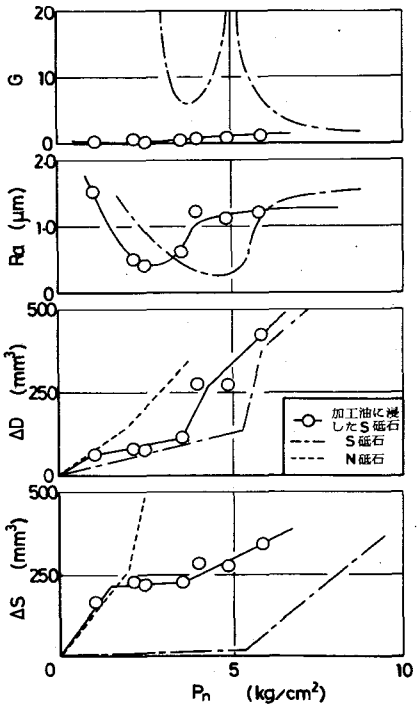


図3−20　いおう処理砥石の切削性能劣化（実験条件Ⅱ，S50C）

界圧力よりやや小さな値とするのが得策である。

2） いおうの充塡には，充塡状態と切削性能の面から，いおうの粘性が小さくなる145℃付近が最適溶融温度である。また，二硫化炭素にいおうを溶解させて充塡することにより，充塡量を少なくできるが，この場合切削性能に充塡効果はほとんど現われない。

3） 砥石には加工条件に合った適切な結合度がある。また，いおう処理した効果が最もよく現われる結合度もある。

4） いおうのもつ砥粒補強効果は，臨界圧力，仕上比を上昇させることによって生産性と経済性を向上させる。また潤滑効果は仕上面あらさを小さくする。

5） ここで用いた加工条件では，S50Cに対し，作業面温度は90°C付近に，鋳鉄やSS41に対してはこれよりも少し高温であると推定できる。このため，これより融点の低いワックス類とステアリン酸は融出するので補強効果はなく，無処理砥石よりもむしろ生産性が低下するが，仕上面あらさを向上させる。

6） 補強強化を目的としてフェノール樹脂で処理した砥石では，その充塡率と重合温度を適当に選ぶと，生産性と経済性はいおう処理よりさらに向上するが，仕上面あらさは悪化する。しかし，硫化脂肪油を用いると，仕上面あらさは他の性能と共に向上する。

7） いおう処理砥石に硫化脂肪油を用いても改善程度が非常に少ないこと，およびいおう処理砥石に鉱油を用いた場合の切りくずからFeSが検出されたことから，気孔中のいおうが極圧添加剤として作用していることがわかる。

8） いおう処理砥石を繰り返し用いると，加工油によっていおうが溶出し，砥石の切削性能は劣化してしまう。

参 考 文 献

1） 山本　明，上田隆司：精密仕上砥石における処理剤の働き，精機学会昭和５１年度関西地方定期学術講演前刷，15.

2） 山本　明，上田隆司：ホーニング用処理砥石におけるいおうの働きについて（第１報），精密機械，**43**，3（1977）305.

3） A.Yamamoto and T.Ueda：Action of Sulfur in Treated Honing Stick, I, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., 掲載予定.

4） 村山新一：フェノール樹脂，日刊工業新聞社，（1975）381.

5） 松森　舜，山本　明：超仕上砥石の仕上性能向上に関する研究（第１報），精密機械，**40**，10（1974）852.

6） 松森　舜，山本　明：超仕上砥石の仕上性能向上に関する研究（第２報），精密機械，**41**，9（1975）884.

7） 山本　明，前田良昭，生田　潔：ホーニング仕上過程における目づまりのインプロセス測定，精密機械，**38**，6（1972）518.

第4章　処理剤の働きについて[1),2)]

4.1. はじめに

第3章で示したように，ビトリファイド砥石気孔中にいおうを物理的に充塡したいおう処理砥石は優れた切削性能を示す。充塡されたいおうの働きには，補強効果・潤滑効果・目づまり抑制効果・冷却効果が考えられる。これらのうち，補強効果・潤滑効果については，第3章において，いおうのほか種々の特徴ある処理剤を充塡した処理砥石を用いてホーニング加工し，それらの切削性能を調べることによって考察を進めてきた。その結果，臨界圧力・仕上量・仕上比の上昇は処理剤による砥粒補強に大いに関係しており，その融点ないしは耐熱温度に関して整理することもできた。切削熱によって処理剤が融出するとき，処理剤の補強効果はなくなり，これらの値は小さくなってしまう。しかし，ステアリン酸やワックス処理砥石では，融出した処理剤の潤滑効果が仕上面の向上に貢献している。また，無処理砥石では処理砥石に比べ目づまり量が多く，これが砥粒を補強するとも考えられる。

そこで，本章では処理剤の働きのうち，補強効果，目づまり抑制効果，冷却効果について詳細に検討してみる。まず，各処理砥石の曲げ強さ，引張強さ，および引っかき強さを測定することによって，切削砥粒の補強に対する処理剤の働きについて検討を加える。次に，第3章で切削実験に使用した砥石の目づまり量を測定し，目づまりの切削性能への影響，特に切削砥粒補強への影響について検討する。また，いおう処理砥石などの熱伝導率を測定し，処理剤の放熱効果についても考察してみる。

4.2. 実験方法

4.2.1. 供試砥石

使用した砥石は3.6節で用いたものと同様で，表4−1の砥石に表4−2に示

表4−1　供試砥石（無処理，記号N）

砥　石	組織（%）			RH硬度
	V_P	V_G	V_B	
WA150J	43.3	43.7	13.0	35.7

表4−2　処理剤および処理砥石の特性値

処理剤	融点（概略値）（°C）	砥石記号	気孔率 V_P'（%）	充填率 $1-V_P'/V_P$（%）	RH硬度
130パラフィン	55	P	7.2	83.4	60
ステアリン酸	70	F	9.2	78.7	73
植物性ワックス	85	K	13.1	69.8	82
塩素化パラフィン	94	P(Cl)	8.0	81.5	92
いおう	119	$S(T)_H$	39.5	8.8	36
		S	7.0	83.8	108
フェノール樹脂	(重合温度 185)	R−5	36.2	16.5	76

すような処理剤を充填したものである。表4−3は供試砥石の寸法であり，使用砥石はすべて同一ロッドで焼成された。

表4−3　供試砥石の形状・寸法

試験	形状・寸法（mm）
ホーニング加工	10×10×50
引っかき	10×10×50
曲げ	10×25×250
引張り	JIS金属材料引張り5号試験片 厚み10
熱伝導率	10×150×150

4.2.2.　曲げ試験および引張試験

実験はインストロン万能試験機を用い，クロスヘッド速度を0.3mm/minとした。曲げ試験は4点曲げ（支点距離200mm，荷重点距離50mm）で行った。また，引張試験では砥石両面にそれぞれ多軸ゲージ（ゲージレングス10mm）を貼付けして，負荷方向とその垂直方向の歪を同時に測定し，弾性係数とポアソン比も求めた。

4.2.3. 引っかき強さの測定方法

図4−1に示すように，立てフライス盤のテーブルに取り付けられた動力計（弾性八角リング）上に砥石を傾斜が1／1000以下になるように固定し，

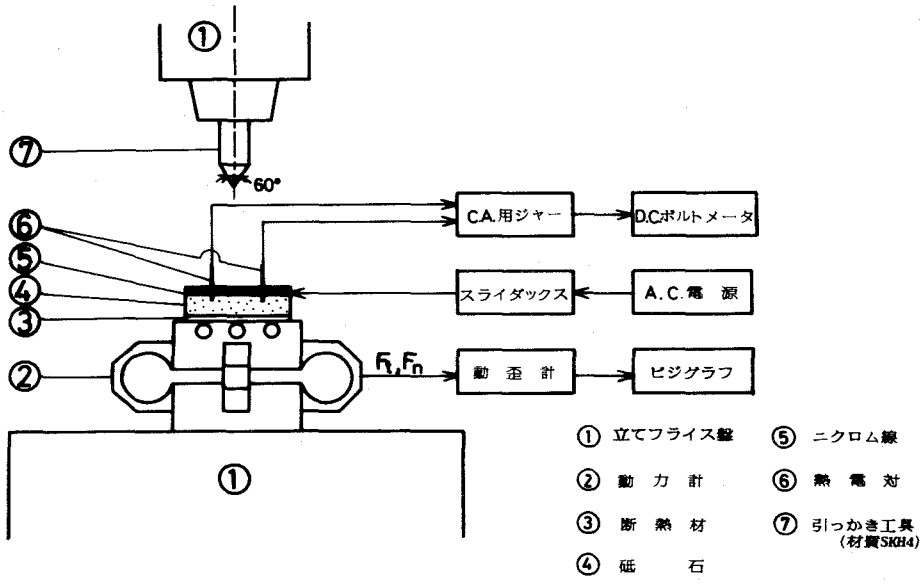


図4−1 実験装置概略図

先端が円錐形の工具（材質 SKH4，先端角60°，みかけの先端幅120〜130 μm）を主軸にドリルチャックでつかみ，定切込みを与えて，V＝20mm／min の速度で引っかき，そのときの接線分力 F_t，法線分力 F_n を測定した。切込み量は20倍顕微鏡で確認した。高温試験における供試砥石の加熱は，砥石に巻き付けたニクロム線を流れる電流量を調整して行い，砥石の2ケ所に埋め込んだクロメルーアルメル熱電対で砥石表面付近の温度を測定した。なお，砥石は表面状態を一定かつ平坦とするため，使用前に定盤上で#120の研摩布でドレスした。

4.2.4. 目づまり量の測定方法

目づまり量の測定には種々の方法[3)]が用いられている。中でも我々の研究

室で開発した磁気的方法[4]はインプロセスで測りうる非常に有効な方法であるが，処理砥石の場合，目づまり量が非常に少ないので測定精度が落ちる。そこで，ここでは微量の鉄でも検出できる比色分析法を用いることにし，鉄の定量分析法として一般的なO－フェナントロリン法[5),6)]を採用した。

表4－4　砥石および処理剤中の鉄の含有量

砥　石	mg／g
N	0.014
P	0.040
F	0.037
K	0.027
P(Cl)	0.021
S	0.008
R	0.037

まず，加工物S50Cを表3－3に示す実験条件Ⅱのもとで加工し，砥石の作業面を平面研削して砥粒と共に目づまりしている鉄を採集する。この採集した試料に（1＋1）塩酸を加え，約20分間加熱し鉄を完全に溶解させて砥粒と分離する。ここで，砥石および処理剤に鉄分が含まれていないことが必要であるが，表4－4に示すように実験誤差とみなせるほど微量であるため，十分に無視することができる。この試料溶液を適量取り，ヒドロキシルアミンを加えて鉄イオンを2価に還元し，酢酸ソーダによってPHを3～6とした後，オルトフェナントロリンを加えて発色させる。Fe(Ⅱ)－O－フェナントロリン錯体の最大吸収波長は図4－2に示すように510mμであるので，この波長において錯体の吸光度を測定する。前もって既知量の鉄を含む標準溶液によって図4－3に示す検量線を作成してあるので，測定した吸光度から定量的に鉄の含有量を知ることができる。

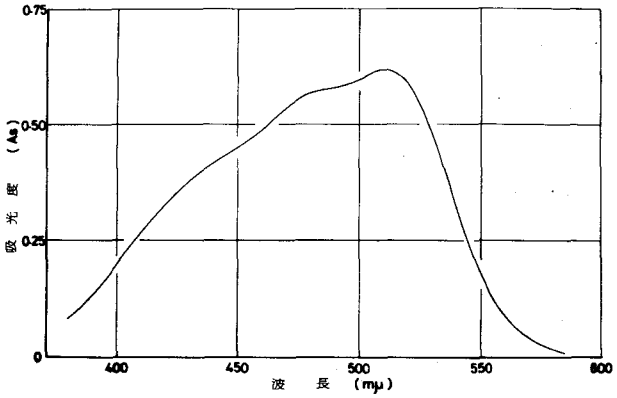


図4－2　Fe(Ⅱ)－O－フェナントロリン錯体の吸収曲線
（試料：0.00308mg Fe／ml）

4.2.5. 熱伝導率の測定方法

図4−4に実験装置の概略図を示す。図に示すように，測定箱中の実験試料は，銅板，ヒーター板，標準試料板（熱伝導率が既知のガラス板），砥石板，銅板を重ね合わせたものであり，各板が密着するように両端を鉄板ではさみ，ボルト・ナットで締め付けてある。また，ヒーターに流れる電流量はスライダックスで調整され，試料を任意の温度に加熱することができる。この時の温度は図に示す3ケ所（板の中心）に挿入されている銅−コンスタンタン熱電対で測定される。なお，面接触をよくするため，砥石面およびガラス面にはシリコーンが塗ってある。

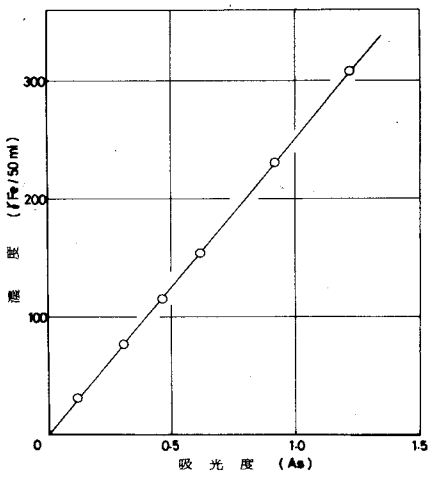


図4−3　Feの検量線
（波長510mμ）

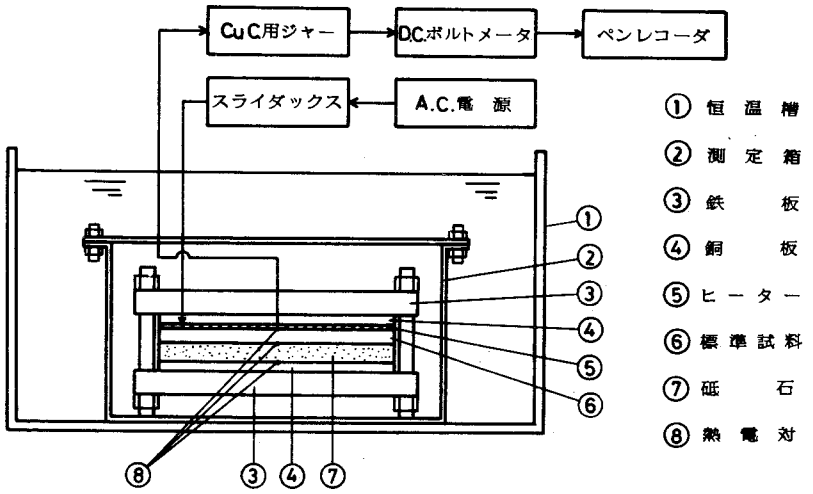


図4−4　実験装置概略図

実験は，まず恒温槽の水を20°Cとし，これに測定箱を沈め，スライダックスでヒーターに一定量の電流を流し，試料を加熱する。このときの熱電対の出力をペンレコーダで記録し，定常状態になったのを確認した後，改めて熱電対の出力を正確に測定する。測定した熱電対の出力をV_0（ヒーターと標準試料の間），V_1（標準試料と砥石の間），V_2（砥石と銅板の間）とすると，砥石の熱伝導率 λ_s は次式で与えられる。

$$\lambda_s = \lambda_g \frac{d_s}{d_g} \frac{V_0 - V_1}{V_1 - V_2}$$

ただし，λ_g：標準試料の熱伝導率（$=2.50\times10^{-3}$ cal／cm・sec・°C（20°C））

d_g：標準試料の厚み（$=0.5$ cm）

d_s：砥石の厚み（$=1$ cm）

4.3. 常温における処理剤の補強効果

4.3.1. 処理砥石の機械的性質

表4−5(a)に各処理砥石の曲げ強さ，引張強さ，同表(b)に無処理N，いおう処理S砥石の弾性係数，ポアソン比の測定結果を示す。いおうの充塡量の少ない$S(T)_H$砥石ではN砥石と強さに対し有意差がなく，補強効果はまずない。しかし，処理剤の強さが大きいレジン処理R−5砥石や充塡量の多い植物性ワックス処理K砥石，S砥石はN砥石に比べ，有意差があり，気孔中の処理剤が補強に貢献していることがわかる。いおうのようなも

表4−5　砥石の機械的性質

(a) 常温における静的強さ

砥石	曲げ強さ（kg／mm²）			引張強さ（kg／mm²）		
	試験片数	平均	標準偏差	試験片数	平均	標準偏差
N	4	3.633	0.093	4	1.810	0.104
K	4	3.853*	0.124	4	2.253*	0.302
$S(T)_H$	3	3.690	0.252	4	1.936	0.332
S	4	4.560*	0.112	4	2.515*	0.180
R−5	4	4.410*	0.125	4	2.260*	0.141

＊はN砥石と比較した場合，有意差（信頼度95％）があるもの

(b) 砥石の弾性定数

砥石	試験片数	弾性係数（10^3kg／mm²）	ポアソン比
N	3	4.10	0.21
S	3	5.60	0.23

ろい材料は圧縮に対しては大きな強さをもつので，曲げに対し圧縮側で補強効果を発揮し，砥石強さを増大させていると考えられる。一方，いおうの引張強さ（表4−6）[7] は砥石の1／10以下であるにもかかわらず，砥石気孔中に多量に充塡することによって砥石の引張強さは約1.4倍となり，十分補強効果を示している。この機構については次節で考察する。

表4−6　斜方いおうの機械的性質（常温）

引張強さ	0.177 kg／mm^2
弾性係数＊	1.84 × 10^3 kg／mm^2
ポアソン比＊	0.345

＊　多結晶体の値がないため，単結晶の値より推定[8),9)]

4.3.2　引張状態におけるいおうの補強機構

砥石は砥粒・結合剤・気孔よりなる複合材料であり，それらの形状，大きさ，配列などが極めて複雑であるため，正確な取り扱いは困難である。そこで，ここではマトリクスを単一材料とし，これに空孔が存在していると考え，いおう処理砥石ではこの空孔にいおうが充満しているとする。このような複合材料の引張強さは最強の並列モデルと最弱の直列モデルの間にあるのが一般的である。ここでは最強の並列モデルの引張強さについて考える。このモデルの最強の場合はいおうと砥石が同時に破壊するときで，この時の引張強さは表4−5，4−6の値を用いるとσ_{max}＝1.89 kg/mm^{2}となる。この値は表4−5のS砥石の値よりもはるかに小さいし，N砥石の約4％増にすぎない。しかも実際には，砥石の破壊時の歪4.41 × 10^{-4}に対応していおうに生ずる弾性応力は0.811kg/mm^{2}となり，いおうの引張強さをはるかに越えるので，いおうはマトリクスの変形に追従できず，先に破壊してしまう。従って，一般の複合材料に適用する並列モデルのような単なる加算的なモデルでは，いおうの実際の補強効果をとても説明できない。

次のモデルを考える前に，N，S砥石の応力−歪線図について考えてみる。図4−5にみるように，N砥石では，歪は広い範囲にわたって応力と直線関係

にあり，完全弾性体とみなせる。これに対し，S砥石ではわずかながら湾曲し，永久歪を生じている。このS砥石と同じ傾向がねずみ鋳鉄（片状黒鉛鋳鉄）においても観察されており，鋳鉄中の黒鉛片の分離や開口などによる巨視的変形がその原因とされている。[10] 黒鉛の強さはマトリクスの1／20～1／25であり，いおうと砥石の間の関係に似ている。そこで，片状黒鉛鋳鉄のモデル[10),11)]をS砥石に当てはめてみる。

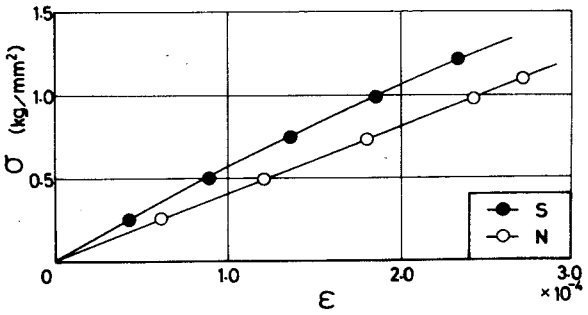


図4—5　応力－歪線図

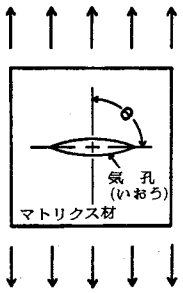


図4—6　いおう処理砥石のき裂モデル

図4—6のような砥石中の1個の気孔を取り出した2次元モデルでは，気孔にいおうが充満しているとすると，引張方向に垂直な方位（$\theta=90°$）のものは平行な方位（$\theta=0°$）のものに比べ，荷重上昇に伴う変形のために破壊しやすく，いおうは砥石から分離してしまう。[11)] 色々な方位をもつ扁平気孔が無数に存在するときには，気孔中のいおうは引張方向に垂直な方位のものから荷重の増大と共に破壊してゆくので，図4—5のような曲線状の応力－歪線図が得られると考えられる。また，いおうが破壊強さに及ぼす補強的働きとしては，破壊時にどの程度いおうが砥石と分離しているかなど現象の把握がむずかしく，詳細はわからないが，次のようなことが考えられる。(i) 荷重方向に垂直な方向の縮みに対して抗力を示し，砥石気孔の変形を妨げる，(ii) いおうの充満によって，空孔時よりも気孔端の応力集

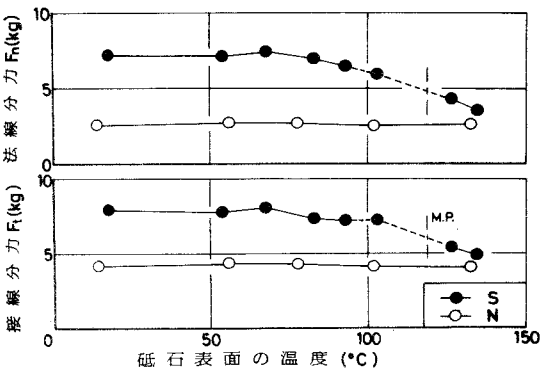
中が緩和される。[12),13)]

4.4. 切削状態における処理剤の補強機構について

前節において，曲げ・引張試験によって，処理剤の充塡量の多い処理砥石や処理剤の強さが大きいレジン処理砥石では，処理剤が補強効果をもっていることが明らかとなった。しかし，切削状態では，砥粒に作用する力の状態はこれらの場合と異なっているし，切削熱による処理剤の軟化や溶融も起こるので，処理剤の働きは変化すると思われる。そこで，切削状態により近い状態で処理剤の補強効果を検討することにした。

4.4.1. 引っかき強さの温度による変化

図4−7にN砥石，S砥石の温度を変化させた場合の引っかき強さを示す。常温付近では両砥石の間に大きな差があるが，約90°C付近からS砥石の強さは低下し始め，いおうの融点(119°C)以上ではほとんど差がなくなってしまう。処理剤が切削に際して切れ刃砥粒を補強するには，処理剤の融点が切れ刃付近の温度以上であることが必要なことは当然といえよう。



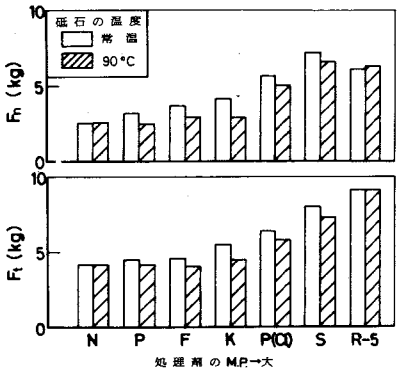
$\triangle h = 400\,\mu m$, $V = 20\,mm/min$

図4−7 引っかき強さの温度による変化

3.6.2節で作業面平均温度と推定された90°Cにおける引っかき強さを調べてみると，図4−8のようになる。常温で補強効果のあったP，F，K砥石も90°Cになると処理剤が溶融してしまい，N砥石とほぼ同程度の強さを示している。従って，作業面温度の低い精密仕上加工では，加工能率と経済性を向上させるための処理剤の選択には融点が一つの重要なキーポイントとなる。

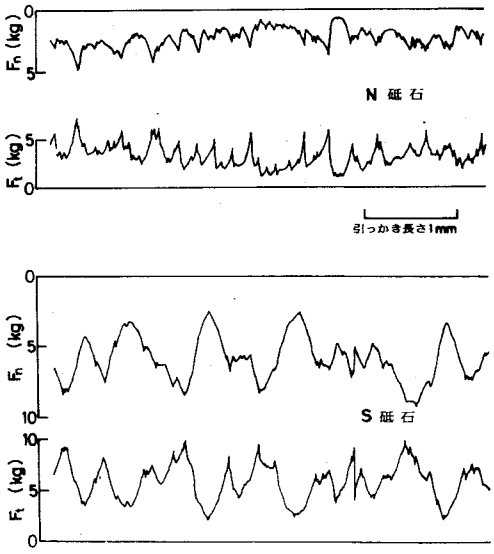
4.4.2 引っかきに対する補強機構

図4−9は砥石表面を常温で引っかいたときのF_t, F_nの出力波形の一例である。ピークは砥粒が離脱するときの抵抗である。N砥石ではピークが小さく，しかも小刻みに振動し，砥粒がもろく破壊している様子がみられる。この大きな方のピッチは砥粒（平均径：約150 μm）の平均配列間隔に近い。これに対し，S砥石では一つ一つのピークが大きく，しかもピッチが長く，2〜数個の集団となって脱落することを示している。これは砥石気孔に充塡されたいおうが，切削砥粒に作用する引っかき力を分散させ，周囲の多数の砥粒で支持することで大きな引っかき力に耐えうること，また破壊した砥粒の逃げ場である気孔をふさぐことで，砥粒の脆性的な面を緩和していることによると考えられる。しかし，砥石温度が上昇し，いおうの融点に近づくと次第にN砥石の波形に近づき，いおうの補強効果は失なわれる。



$\triangle h = 400\,\mu m$, $V = 20\,mm/min$

図4−8 処理砥石の引っかき強さ



$\triangle h = 400\,\mu m$, $V = 20\,mm/min$

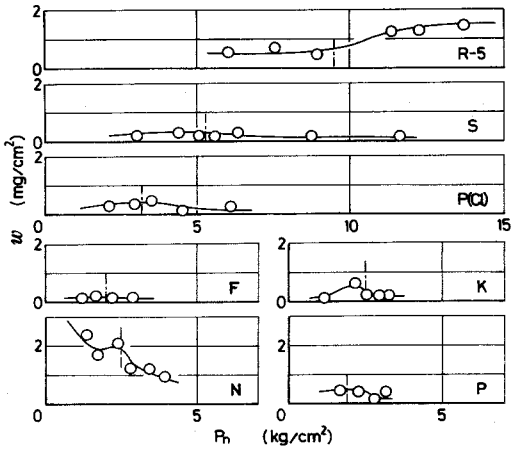
図4−9 F_t, F_nの出力波形

4.5. 処理剤の目づまり抑制効果

4.5.1. 処理砥石の目づまり量と目づまりによる砥粒補強

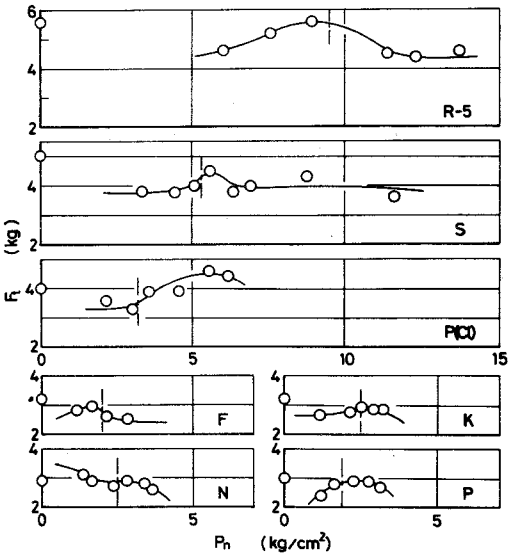
加工物 S50C を加工した後の砥石作業面の目づまり量 w および引っかき強さ F_t を測定し，加工時の砥石圧力 P_n について整理したものが図4−10，図4−11 である。F_t は引っかき深さ $\triangle h$ を200〜500 μm として，内挿法によって250 μm の値を扱っている。ここで $\triangle h = 250\,\mu$m と浅くしたのは，目づまりなどの影響をより強く反映するためである。

図4−11 において，N砥石の F_t だけが P_c 以下の砥石圧力で，$P_n = 0$ の位置に示したドレス直後の値よりやや大きくなっている。これは図4−10 にみるように，P_c 以下で w が増加し，これが砥粒の補強にあずかるためと考えることができ，このため図3−14 左図でN砥石の P_c がP，F砥石よりも大きくなっている。これに対し，処理砥石では一般に，P_c 以下や P_c 以上の砥石圧力で F_t がドレス直



一点鎖線 ： P_c 位置

図 4−10　砥石作業面の目づまり量

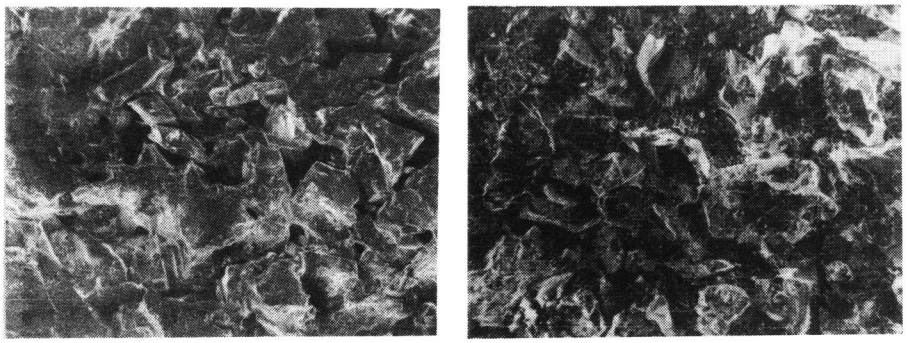


一点鎖線：P_c 位置，$\triangle h = 250\,\mu$m，$V = 20$mm／min

図 4−11　砥石作業面の引っかき強さ

後より低下している。

そこで，この強度変化の原因を知るため，P_c（≒5.5 kg／cm^2）をはさむ二つの P_n，3および11.6 kg／cm^2 の下で加工した後のS砥石作業面を走査電顕で調べたのが図4−12である。前者では，表面に開口した気孔中にほとんどいおうが存在せず，溶出と機械的摩耗によって消失したと考えられる。しかし，引っかき強さ F_t の低下が少ないことから，この消失はごく表層に



$P_n = 3$ kg／cm$^2 < P_c$　　$P_n = 11.6$ km／cm$^2 > P_c$

図4−12　いおう処理S砥石の作業面（写真の大きさ左右700 μm）

限られる。これに対し，後者ではほとんど表面近くまでいおうが充満していて，砥粒損耗による作業面後退速度がいおう消失速度より遅くないことを示している。また，いおうの表面は直径10 μm 程度の小球の集まりになっていて，表面が溶融したと思われる形跡を残している。

従って，図4−11において，処理砥石の F_t が P_c 以下の砥石圧力で低下するのは，処理剤が消失してしまうためや処理剤の目づまり抑制効果によって砥粒補強が得られないためと考えられる。また，P_c 以上の圧力で一般に F_t が低下しているのは，切れ刃温度の増大による処理剤の溶融，および砥粒のはげしい脱落に伴う砥石作業面あらさの増大に原因していると考えられる。

4.5.2　目づまり量と仕上面あらさの関係

ホーニング加工のような精密加工では，優れた仕上面あらさR_aを得るためには仕上期において適度の目づまり切削状態が必要であるといわれてきた。いま，加工後の目づまり量wとR_aの関係をプロットしてみると，図4−13のようになり，N砥石ではwの増加と共にR_aが向上していることがわかる。図には現われていないが，過大目づまり量は溶着とか掘り起こしによって仕上面をあらすから，当然wに限界量のあることが想像できる。これに対し，S砥石ではいおうの目づまり抑制効果のためwは非常に少ないうえ，wとR_aの間に相関関係はなく，処理剤が目づまりの代わりをしているという見方もできる。すなわち，処理砥石では，R_a向上には目づまりを必ずしも必要としないともいえる。

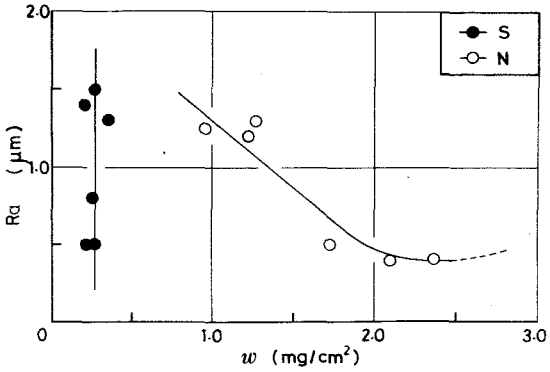


図4−13　目づまり量と仕上面あらさの関係
（実験条件Ⅱ，S50C）

4.6. 処理砥石の熱伝導率

砥石は砥粒・結合剤・気孔の3成分によって構成される複合材料であり，その熱伝導率は構成物質それぞれの熱伝導率，形状と配列，含有率などの影響を受ける。表4−2に示すように，いおう処理砥石では気孔の80数%をいおうが占めており，わずかの気孔を無視するなら，いおう処理砥石も砥粒・結合剤・いおうの3成分で構成されていると考えることができる。いおうは空気に比べ表4−7にみるように約10倍と大きな熱伝導率をもっており，当然，いおう処理によって砥石の熱伝導率は大きくなり，切削の際生ずる有害な切削熱を取り除く効果も大きくなると考えられる。

次に理論的に砥石のような複合体の熱伝導率を求めてみよう。ウイーク・ポイントが利くような強さの場合と異なり，熱伝導率や弾性係数のような物理的性質は，一般に理論値とよく合うと考えられている。これらについてはその両極端として図4−14に示す配列(1)のような直列モデルと，(2)のような並列モデルが考えられる。また，配列(3)は実際に近い形のモデルを考えており[14)〜16)]，これらの熱伝導率 λ_S は次式で与えられる。

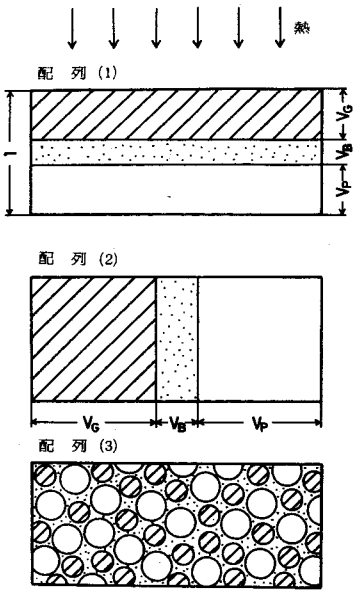


図4−14　砥石構造のモデル

配列(1)

$$\lambda_S = \frac{1}{\dfrac{V_G}{\lambda_G} + \dfrac{V_B}{\lambda_B} + \dfrac{V_P}{\lambda_P}}$$

配列(2)

$$\lambda_S = V_G\,\lambda_G + V_B\,\lambda_B + V_P\,\lambda_P$$

配列(3)

$$\lambda_S = \lambda_B \frac{1 - 2\left[V_P \dfrac{\lambda_B - \lambda_P}{2\lambda_B + \lambda_P} + V_G \dfrac{\lambda_B - \lambda_G}{2\lambda_B + \lambda_G}\right]}{1 + \left[V_P \dfrac{\lambda_B - \lambda_P}{2\lambda_B + \lambda_P} + V_G \dfrac{\lambda_B - \lambda_G}{2\lambda_B + \lambda_G}\right]}$$

ただし，λ_G，λ_B，λ_P　：砥粒，結合剤，気孔中の物質の熱伝導率

V_G，V_B，V_P　：砥粒，結合剤，気孔の体積率

表4−8に，無処理N砥石，いおう処理S砥石（表4−1，4−2参照）およびこれらの砥石を加工油A（表3−2参照）に浸したNo 砥石，So 砥石の熱伝

導率について，測定した結果およびEuckenの式（配列(3)）を用いて計算した結果を示す。なお，計算には表4−7に示す値を用い，いおう処理砥石や加工油に浸したNo砥石では気孔をいおうや加工油に置き換えて計算した。

表4−7　構成物質の熱伝導率（cal／cm・sec・°C）

物　質	常　温	80℃*
砥　粒[17]	8.57×10^{-2}	7.31×10^{-2}
結合剤[15]	3.0×10^{-3}	3.15×10^{-3}
空　気[18]	5.63×10^{-5}	6.51×10^{-5}
いおう[7]	6.50×10^{-4}	5.5×10^{-4}
加工油[19]	3.23×10^{-4}	3.18×10^{-4}

＊は外挿法などによる推定値である

表4−8　砥石の熱伝導率（10^{-3}cal／cm・sec・°C）

砥　石	実験値 20°C	計算値 常　温	計算値 80°C
N	4.53	5.02	5.16
S	5.44	5.86	5.83
No	6.81	5.40	5.51
So	6.78	—	—

表より明らかなように，常温において実験値と計算値は比較的よく一致しており，砥石の熱伝導率はEuckenの式によって計算できることがわかる。一方，N砥石に比べ，S砥石の熱伝導率は20％程度大きくなってはいるが，加工油に浸すといずれもほぼ同じになっている。切削状態では，砥石は温度上昇しており，かつ温度分布をもつので，定性的に論じるにしても高温における熱伝導率が必要となる。そこで，Euckenの式によって80°C付近の値を計算した結果をみると，常温における傾向と似ており，乾式切削ではいおうが切削熱放散に役立つが，湿式切削では加工油の働きが大きく，いおう処理による放熱効果の向上は失なわれてしまうことがわかる。

4.7. 本章の結論

いおうのほか種々の処理剤を充塡した処理砥石を用いて，処理剤の砥粒補強，および目づまり抑制効果の様子を調べ，これらが切削性能に及ぼす影響について考察すると共に，処理剤の放熱効果についても検討した。その結果をまとめると次のようになる。

(1)　砥石のような多孔質材では，砥石よりもはるかに強さの小さい処理剤

でも気孔中に多量に充塡すれば，曲げ強さや引張強さが大きくなり，処理剤は補強材として働く。引張りの場合，処理剤の補強機構は複雑であるが，いおう処理砥石の変形挙動はねずみ鋳鉄に似ていると考えられる。

(2) 処理剤が切削時に補強効果を示すには，その融点が砥石作業面平均温度よりも高いことが必要である。このことが，いおうが優れた生産性と経済性を示す一原因となっている。

(3) 処理砥石では処理剤の目づまり抑制効果によって，目づまり量wは大幅に減少する。これに対し，N砥石ではwが多く，目づまりによる砥粒補強が臨界圧力 P_c を大きくする一原因となっている。

(4) N砥石ではwの増大と共に仕上面あらさ R_a が向上するが，有効な処理砥石では，wは R_a と無関係で，むしろ固形処理剤が目づまりの代わりをし，その潤滑効果も手伝って優れた仕上面を作り出すと考えることができる。

(5) 無処理砥石に比べ，いおう処理砥石の熱伝導率は 20 %程度大きいが，加工油に浸すといずれの砥石もほぼ同程度となり，いおう処理による放熱効果の向上は失なわれてしまう。

参 考 文 献

1) 山本　明，上田隆司：ホーニング用処理砥石におけるいおうの働きについて（第2報），精密機械，**43**，9（1977）1025.

2) A.Yamamoto and T.Ueda : Action of Sulfur in Treated Honing Stick, II, Bull. Japan.Soc.of Prec.Engg. 投稿中.

3) 佐田登志夫，中島　澄，吉川弘之：分光分析法による研削砥石の目づまり測定，精密機械，**26**，10（1960）607.

4) 山本　明，前田良昭，生田　潔：ホーニング仕上過程における目づま

りのインプロセス測定，精密機械，**38**，6（1972）518.

5）　平野四蔵編：無機応用比色分析2，共立出版（1974）334.

6）　I. M.Kolthoff and P. J.Elving : Treatise on Analytical Chemistry, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, (1962) Part Ⅱ, 295.

7）　J. W. Mellor : A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, Vol. X, Longmans, London, (1930) 53.

8）　R. F. S. Hearmon : The Elastic Constants of Anisotropic Materials－Ⅱ, Advan. Phys., 5 (1956) 323.

9）　R.Hill : The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate, Proc. Phys. Soc. Lond., 65A (1952) 349.

10）　日本金属学会強度委員会編：金属材料の強度と破壊，丸善（1975）256.

11）　宮本　博，尾田十八，江田祐二：複合材料の機械的性質に及ぼす第2相材の形状効果，日本機械学会講演論文集，760－2（1976）57.

12）　J. N. Goodier : Concentration of Stress around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws, Trans. ASME, 55 (1933) 39.

13）　K. Sezawa and G. Nishimura : Stresses under Tension in a Plate with a Heterogeneous Insertion, Rept. Aeron. Res. Inst., Tokyo Imp. Univ., 6 (1931) 25.

14）　斎藤　武，西垣　理：湿った物質の伝熱特性，日本機械学会誌，**62**，484（1959）741.

15）　高沢孝哉：研削熱の加工物への流入割合，精密機械，**30**，12（1964）914.

16）　A.Eucken : Die Wärmeleitfähigkeit keramischer feuerfester Stoffe, VDI－Forsch－Heft., **3**, 353 (1932) 1.

17）　たとえば，日本化学会編：化学便覧，基礎編Ⅱ，（1975）985.

18）　たとえば，玉虫文一編：理化学辞典，（1974）345.

19）　山本　明，鈴木音作：切削油剤とその効果，朝倉書店（1965）252.

第5章　固体潤滑剤添加による処理砥石の性能向上[1)~3)]

5.1. はじめに

これまで示したように，処理に伴う臨界圧力，仕上量，仕上比の変化は砥粒補強に大いに関係しており，また切削熱によって処理剤が溶融するか否かが処理剤の補強効果を通じて切削性能に大きく影響した。一方，溶融する場合，それが特殊な潤滑性能をもつときには生産性，経済性は劣るが，仕上面が向上した。また，いおう処理砥石でも切れ刃近傍では高温であって，いおうが極圧添加剤として働きうることも確認された。さらに切削砥粒をフェノール樹脂のような潤滑性に乏しい処理剤で補強した場合，いおう処理砥石と同様に砥石損耗量が減少し，臨界圧力，仕上量，仕上比が上昇して生産性と経済性が向上するが，逆にあらさが悪化する欠点があった。従って，以上の結果より，処理剤が具備すべき条件は，切削性能の面から考えるなら，高い融点をもち，切削状態においても補強効果を示すもので，かつ潤滑性能の高いものであるといえる。しかし，処理剤の潤滑性能は仕上面向上のみではなく，臨界圧力，仕上量，仕上比などの切削性能にも当然影響を及ぼしていると考えられる。

そこで本章では，補強効果のみ著しいレジンに黒鉛，二硫化モリブデン，テフロン，フッ化黒鉛といった固体潤滑剤を少量添加した処理剤を作り出し，その効果を検討すると共に，潤滑効果が切削性能に及ぼす影響を考察する。また，いおう処理砥石の切削性能と比較し，いおうの代替品について検討を加える。さらに，この結果をいおう処理砥石に応用し，黒鉛添加による改善を試みる。

5.2. 研究方法

5.2.1. 使用した固体潤滑剤の物性

表5−1に黒鉛，[4)~6)]二硫化モリブデン（MoS_2），[7)] テフロン（PTFE）[8),9)]

表5−1　固体潤滑剤の物性

固体潤滑剤	黒　鉛	二硫化モリブデン	テフロン	フッ化黒鉛
比　重	2.3	4.8〜5.2	2.2	2.3〜2.5
粒　径（μm）	0.2〜0.4	0.2〜0.4	0.3	0.1〜0.3
色	黒	黒	白	白
分解開始温度（°C）	530	370	250	390

フッ化黒鉛（$(CF_x)_n$）[10)〜13)]の物性を示す。

テフロンを除く各固体潤滑剤はいずれも層状結晶構造をもち，せん断強さが弱いことを特色とする。テフロンもこれに似た機構で潤滑に寄与する。基礎的な研究によると，一般に MoS_2 の方が黒鉛よりも摩擦係数が小さく，潤滑剤として優れているといわれる。両者の潤滑性能は雰囲気によって異なり，黒鉛の場合，微量の水蒸気のある空気中でよく，真空中で悪いが，MoS_2 はこれと逆の特性を示すし，また，荷重とすべり速度が摩擦係数に与える影響も逆である。さらに，黒鉛は室温と500°Cで摩擦係数が小さく，中間温度域で悪化するのに対し，MoS_2 は100°C以下よりは劣るが，370°Cまでよい値を示す。[14)] テフロンは黒鉛や MoS_2 よりも低い摩擦係数を示す高分子材料である。しかも，雰囲気の影響をほとんど受けず，耐熱性も高分子材料の中では高い。$(CF_x)_n$ はカーボン・ブラックにフッ素を反応させたもので，実験に使用したものは $x \fallingdotseq 1.1$ である。歴史の新しい材料であるため潤滑特性についての研究は少ないが，大きなPV値の下では上の3つの材料よりも優れた潤滑性能を示すといわれる。[10)] また，テフロンと同様，雰囲気の影響を受けず安定である。これらの固体潤滑剤はフェノール樹脂などレジンと混合してよく用いられている。[7)] この場合，レジンは接合剤として働いており，レジンの割合を多くすると潤滑性能が悪くなり，逆に少ないと接着力が弱くなる傾向を示す。これらが砥石気孔に充塡されて切削環境におかれたとき，上述の研究条件下におけるよりも複雑な対応をすることが当然予想される。

5.2.2. 使用砥石および処理方法

(i) レジン処理

表5−2(a)に示す砥石に，表5−1に示した4種類の固体潤滑剤を添加したレジンを充填し，表5−2(b)に示す処理砥石を作った。添加割合は表に示すようにレジン20gに対して0.008gから10gまで変化し，添加量の同じものは砥

記号の最後の数字を同じにした。テフロンおよびフッ化黒鉛では添加量を10gとすると，処理剤の粘性が大きくなり過ぎ，充填できなかった。

充填方法として，まずメチルアルコール100cc（20°C）にレジン（ノボラック型フェノール樹脂）20gを溶かし，この溶液に所定量の固体潤滑剤を加え，ホモジナイザー（17000rpm）で攪拌する。これに砥石を浸し，レジンを気孔中に充分吸い上げた後，自然乾燥し，図5−1に示す最高温度185°Cに4時間保持する24時間加熱プログラムでレジンを重合させた。

表5−2　レジン処理砥石

(a) 供試砥石

砥石	組織（%）			RH硬度
	V_P	V_G	V_B	
WA150J	44.0	44.2	11.8	36.3

(b) 固体潤滑剤の添加量および処理砥石の特性値

添加量(g)（レジン＝20g）		砥石記号	気孔率 V_P' (%)	充填率(%) $1-V_P'/V_P$	RH硬度
	0	R	38	13	79
黒鉛	0.2	R(C)3	38	14	83
	1.0	R(C)4	38	14	87
	5.0	R(C)5	37	15	80
	10.0	R(C)6	36	18	75
MoS_2	0.2	R(Mo)3	38	13	83
	1.0	R(Mo)4	38	13	86
	5.0	R(Mo)5	37	15	85
	10.0	R(Mo)6	37	15	77
PTFE	0.2	R(T)3	39	12	79
	1.0	R(T)4	39	12	79
	5.0	R(T)5	38	14	71
$(CF_x)_n$	0.008	R(CF)1	38	13	77
	0.04	R(CF)2	38	13	78
	0.2	R(CF)3	38	14	78
	1.0	R(CF)4	38	14	75
	5.0	R(CF)5	37	16	71

この際，固体潤滑剤とレジンの反応が問題となるが，フッ化黒鉛を除いて安定であり，潤滑性能が劣化する恐れはないと考えられる。フッ化黒鉛では加熱によって白色から黒色に変化するので，フッ素が多少遊離しているのではないかと思われる。

(ii) 黒鉛を添加したいおう処理

表5−3(a)に示す砥石に黒鉛を添加したいおうを充填し，同表(b)に示す処理砥石を作った。添加割合は表に示すように，いおう100gに対し3段階とした。なお，5g以上の添加では，いおうの粘性が大きくなり過ぎて充填が困難であった。また，テフロン，フッ化黒鉛はいおう融液に一様に分散せず，添加することができなかった。

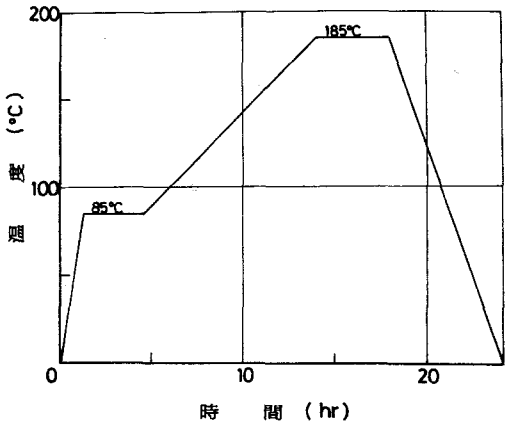


図5−1 レジン処理砥石の加熱プログラム

充填はいおう処理と同様の手段によった（第2章参照）。まず，所定量の粉末いおうと黒鉛を乳鉢を用いて十分に混合した後，145°Cの溶融液中へ

表5−3 いおう処理砥石

(a) 供試砥石（記号：無処理N）

砥石	組織 (%)			RH硬度
	V_P	V_G	V_B	
WA 150 J	41.5	46.6	11.9	42.9

(b) 黒鉛の添加量および処理砥石の特性値

添加量(g) (S=100g)	砥石記号	気孔率 V_P'(%)	充填率(%) $1-V_P'/V_P$	RH硬度
0	S	9	79	103
0.2	S(C)1	9	79	103
1.0	S(C)2	9	79	104
5.0	S(C)3	9	79	106

150°Cに加熱されている砥石を浸して充填した。この際，黒鉛はいおうと反応する恐れはないと考えられる。

5.2.3. 実験方法

実験は3.2節と同様1本の砥石で円筒外面を仕上げる簡単な方法によった。実験条件は表3−3と同じであり，使用した加工物材料を表5−4に示す。ここで，溶着性の強いステンレス鋼やアルミニウムを加えたのは，処理剤のもつ潤滑性能がより顕著に現われるであろうと考えたからである。

なお，実験に先だち，加工物は旋削による前加工で平均あらさ R_a = 4.5 ～ 6.5 μm（ただし，アルミニウムでは6.5～7.5 μm）とした。

表5−4 使用した加工物材料

加工物	材質	硬度 H_V	形状(mm)
炭素鋼	S50C	199	φ(60～55)×60
炭素鋼	SS41	144	φ(70～65)×60
ステンレス鋼	SUS304	205	φ(60～55)×60
アルミニウム	A1050BE	33	φ(70～65)×60

5.3. レジンベース処理砥石の性能

5.3.1. 黒鉛添加による切削性能の変化

図5−2は実験条件Ⅱのもとで S50C を加工したときの，砥石圧力 P_n に対する仕上期のみがき状態における切削抵抗接線分力の変化であり，図5−3は各処理砥石表面を先端角60°の円錐形工具で引っかいたときの接線抵抗（引っかき強さ）F_t を比較したものである。切込み量 $\triangle h$ = 400 μm，引っかき速度 V = 20 mm／min である（4.2.3節参照）。

図5−2において，黒鉛の添加量によって切削抵抗が変化し，R(C)4砥石で最も小さく，臨界圧力 P_c も大きく上昇している。一方，表5−2(b)と図5−3にみるように，RH硬度と F_t は同じR(C)4砥石で最も大きくなってい

て，黒鉛はレジンの補強材として働いているともいえる。そして，R(C)5，R(C)6 砥石と黒鉛添加量が多くなるに伴ってレジンが脆化し，RH硬度や F_t が低下したと考えることができる。前述のように，同じ砥石圧力 P_n の下ではR(C)4砥石の切削抵抗が最も低くなっているが，砥石の切削性能と切れ刃の状態は P_c の前後で大きく変わるので，この比較には注意がいる。例えば P_c における切削抵抗を比較してもよいが，仕上量が異なることを注意しなければならない。

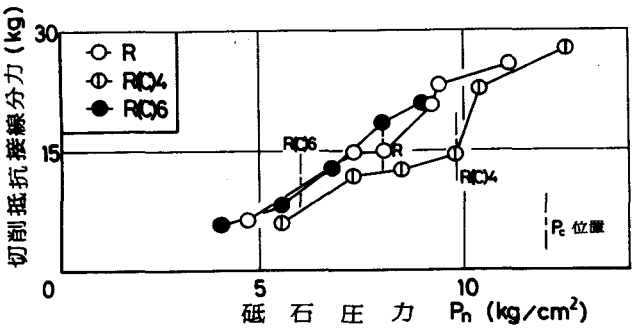


図5−2　砥石圧力に対する切削抵抗接線分力の変化
（実験条件Ⅱ，S50C）

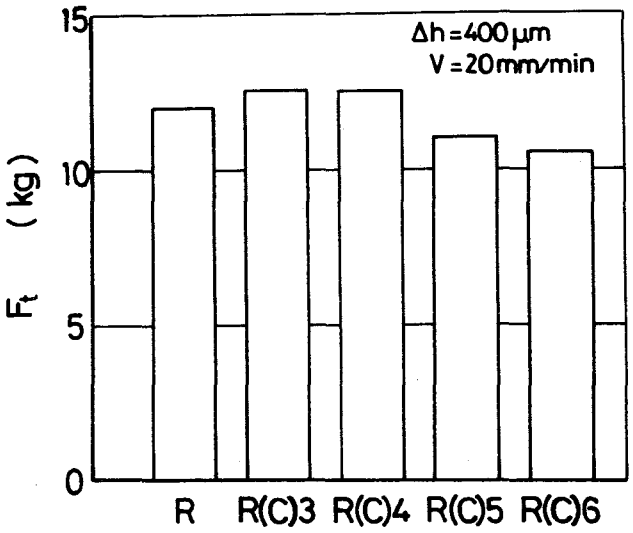


図5−3　添加量が引っかき強さに及ぼす影響

図5−4は図5−2と同じ条件で加工し，P_c における切削性能を比較したものである。添加量によって P_c は大きく変化し，P(C)4砥石において砥石損耗量$\triangle S$，仕上比G（$\triangle D/\triangle S$）および仕上面あらさ R_a が最も優れているが，反面，仕上量$\triangle D$が最も小さくなっている。P_c における切れ刃状態が変らないとすれば，P_cが高いほど$\triangle S$と$\triangle D$は大きくなるはずであるのに，実際はこれに逆行している。補強によって切削切

れ刃が長く保持され，多くの摩耗した切れ刃で切削していると考えることができるならば，R_a が小さくなることも説明できる。ところが，P_cは目こぼれ切削状態への転移点であるから，この圧力下では切れ刃の破砕がそれ以下の圧力におけるよりも激しくなっていると考えるべきであり，上のように切れ刃が摩耗した状態にあるとみるのは不適当であろう。そこで，$\triangle D$，$\triangle S$，R_a の低下の幾分かは潤滑性能の向上によってもたらされたのではないかと考えられる。図5−2において，P_cにおける摩擦係数は P_c と原点を結んだ直線の勾配に当たるが，これはP(C)4 砥石で小さい。もっとも，切削抵抗は切取り量に関係するが，みがき期における値であるので，この影響は無視できる。図3−16（3.6.3節）に，ここで用いたと同じ条件でレジンの充塡量を変えたときの P_c における切削性能を示したが，充塡量の増加（充塡率22.7％まで）に伴って P_c，$\triangle D$，Gは上昇し，R_a は悪化している。補強に伴う$\triangle D$ の増加および R_a の悪化は上の図5−4と逆であり，これからもR(C)4 砥石では潤滑効果の存在を考えねばならぬことになる。固体潤滑膜が存在し，これが砥粒切込みを妨げて$\triangle D$を減少させ，また R_aを改善したとみるべきであろう。

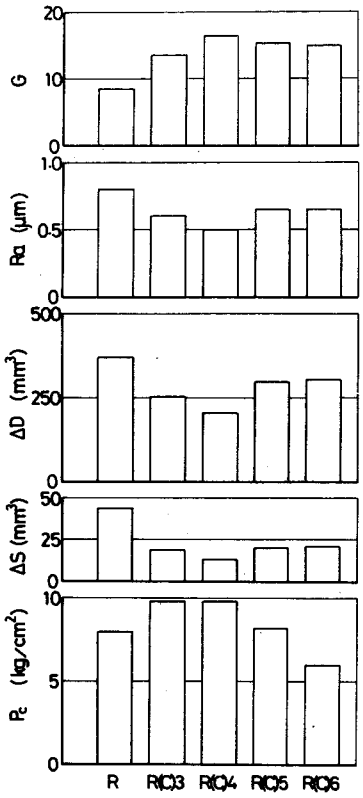


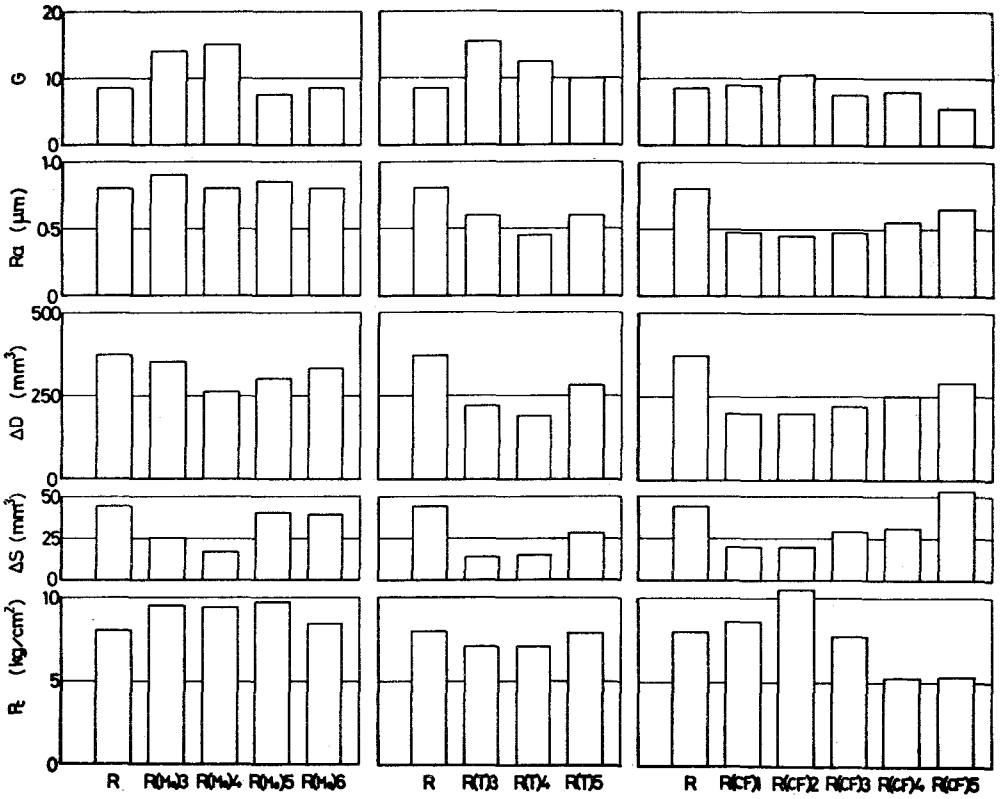
図5−4 黒鉛を添加したレジン処理砥石の切削性能

（実験条件Ⅱ，S50C）

5.3.2. MoS_2，テフロン，フッ化黒鉛添加による切削性能の変化

これらを添加したときのＲＨ硬度の変化は表5−2(b)に付記するようで，黒鉛添加の場合と同様，ある添加量でこの硬度は最大になる。最大値を与える添加量は MoS_2 とテフロンでは黒鉛とほぼ同量であるが，フッ化黒鉛では少なくなる。また，テフロンとフッ化黒鉛では得られる最大硬度は無添加Ｒ砥石と同程度もしくは少し低くなっている。

図5−5はそれぞれを添加したときの添加量と切削性能の関係を示している。全般的にはテフロン添加の場合を除き，黒鉛添加の場合も含めて，ＲＨ硬度



MoS_2添加　　テフロン添加　　フッ化黒鉛添加

図5−5　MoS_2，テフロン，フッ化黒鉛を添加したレジン処理砥石の切削性能
（実験条件Ⅱ，S50C）

最大となったもの（R(C)4，R(Mo)4，R(CF)2）がそれぞれのグループでほぼ，P_c が最大，R_a が最小，$\triangle D$ が最小，G が最大となっている。

これらの砥石にR(T)4砥石を加えた4つの砥石の性能を無添加R砥石，および表5−2(a)の砥石をいおう処理したS砥石のそれと比較してみると図5−6のようになる。この図にはSUS304を加工したときの結果も記入してあるが，仕上面あらさ（R_a），生産性（$\triangle D$），経済性（G）の3つが同時に優れるものはなく，どれかを譲って採用しなければならない状態にある。$\triangle D$ の大きいRとR(Mo)4砥石は R_a も大きい。また，P_c の大きいものが，必ずしも $\triangle D$ が大きいと限らない。R_a の一番小さいのはS砥石であるが，これに近くて $\triangle D$ と G の優れるものはR(C)4とR(T)4砥石であろう。

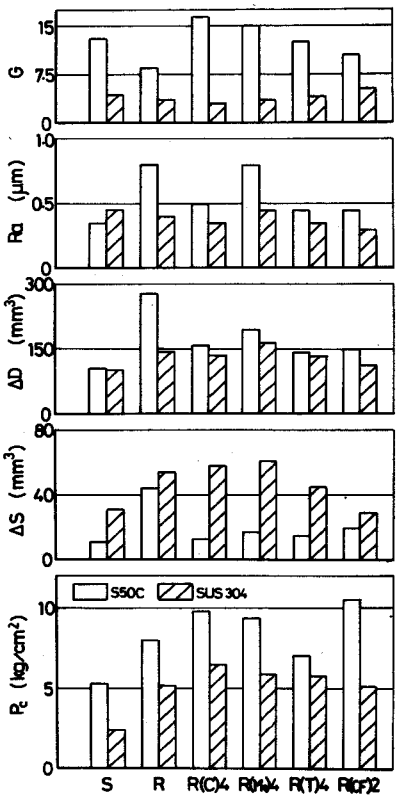


図5−6　レジン処理砥石といおう処理砥石との比較
（実験条件Ⅱ）

加工材料がねばいSUS304に変わると，P_c が減少し，$\triangle S$ が増加して G も悪くなる。それにも拘らず，R_a がS50Cの場合より逆に向上するのは，やや増加したであろう目づまりが，潤滑剤の働きをかりてうまくみがき作用に貢献するためと考えることもできる。

以上にみるように，公害の点で問題となるいおう処理砥石に対し，固体潤滑剤を混入したレジン処理によって，R_a についてはいおうに近い値を示し，しかも生産性や経済性に優れた砥石を作ることができるとわかった。この何れを選ぶかは目的によって決定されるべきである。

5.3.3. 加工油に黒鉛，MoS_2 を添加した場合との比較

この２つの添加剤の切削性能への影響をさらに知るため，Ｒ砥石を用い，加工油にこれらを添加して，実験条件ⅡでＳ50Ｃを加工してみた。図5−7は P_c と P_c における切削性能を示し，また同じもので処理した砥石の性能と比較してある。加工油への添加量は重量で0.5％である。

図において，この２つの添加剤はともに，変化割合は処理砥石の場合よりは少ないが，$\triangle S$ と $\triangle D$ を減少させ，また R_a を向上させている。MoS_2 添加加工油の P_c 増加の理由は明白でない。5.3.1節において，適量の固体潤滑剤を添加した処理砥石では P_c が増加するにも拘らず，$\triangle S$ と $\triangle D$ が減少した理由の１つとして潤滑効果を考えたが，この考えは加工油に添加した場合にも同じことが起こっているので十分支持できる。この場合，加工油添加と処理剤添加との差は黒鉛の場合が大きい。これは黒鉛の方が補強に大きく貢献するためである。

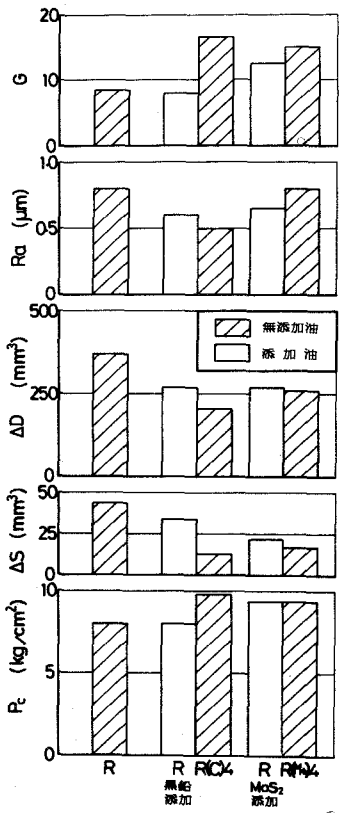


図5−7　加工油に固体潤滑剤を添加した場合との比較（実験条件Ⅱ，S50C）

5.4. いおう処理砥石の改善

いおう処理砥石は優れた切削性能をもっているが，上の結果に基づき，いおうに黒鉛を添加して切削性能の改善を試みた。なお，MoS_2 も添加してみたが，SS41やアルミニウムに対して優れた切削性能を示さなかった。

図5−8は実験条件ⅡでSS41を加工したときの P_c における切削性能をまとめたものである。黒鉛の添加量を増すに従いＲＨ硬度が上昇する（表5−3

(b)参照）が，図でもこれにほぼ伴って P_c が上昇し，$\triangle S$ が減少している。$\triangle D$ もやや減少するが，$\triangle S$ の減少が大きいので G が著しく上昇する。しかし，R_a の向上がみられるのはS(C)2砥石のみである。S(C)3砥石では加工時間内にみがき期に入らず，R_a が大きくなった。

次に，溶着型目づまりを生じて仕上面がむしれ，加工のむずかしい純アルミニウムに対して試みてみた。S(C)2砥石を用い，実験条件Ⅰの下で加工したときの仕上経過を図5—9に示す。L は切削距離であり，比較のため無処理N砥石の場合も併記してある。この材料の加工では，発達した目づまりによって仕上面が荒れ始める前に加工を打ち切ることが重要である。また，普通に使われる砥粒よりも脆弱な破砕砥粒を用いるとき，細かく破砕する切れ刃の脱落時に溶着金属がもち去られるので，切削性能は向上する（6.6.1節参照）。図において，矢印の所で最小あらさが得られ，これよりも加工時間が長くなると悪化する。S(C)2砥石はN砥石に比べて，この所における $\triangle D$ は少ないが，R_a は小さく，しかもこれに近いあらさは半分の切削距離でも得られる。無添加のS砥石ではアルミニウムに対し潤滑性が乏しく，また補強効果が強く働くため，加工後早い時間に溶着目づまりを生じ切削続行が不可能となった。

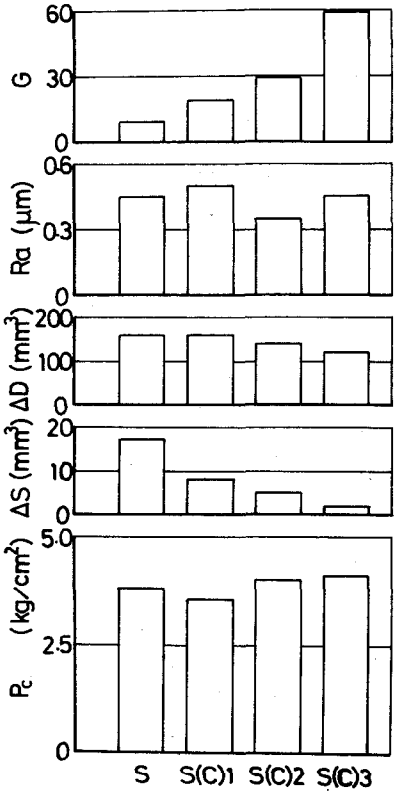


図5—8　いおう処理砥石の黒鉛添加による改善
（実験条件Ⅱ，SS41）

5.5. 本章の結論

いおう処理砥石が優れた切削性能を示す1つの主原因はいおうの補強効果

にあるが，補強効果のみが著しいレジンに固体潤滑剤を加えて切削性能の向上をはかり，またこの研究を通じて，潤滑効果が切削性能に及ぼす影響を知ろうとした。研究は，フェノール樹脂に黒鉛，二硫化モリブデン，テフロン，フッ化黒鉛を加えることによって行った。得られた結果は次のようである。

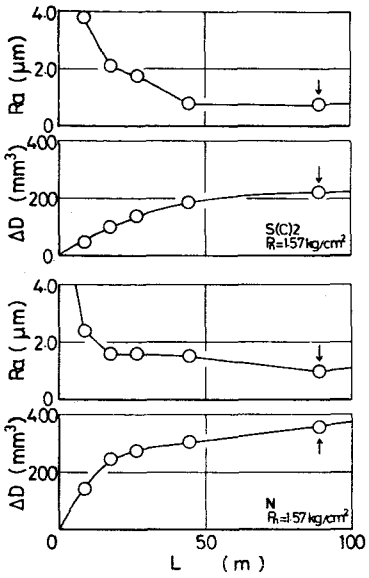


図5−9　いおう処理砥石の黒鉛添加による改善
（実験条件Ⅰ，アルミニウム）

1）　固体潤滑剤の少量（5W％程度以下）添加によって一般に P_c が上昇し，R_a が向上するが，P_c における $\triangle S$，$\triangle D$ は無添加の場合よりも減少する。これはレジンの充填量を増加して補強効果を増してゆくときの $\triangle D$，R_a の増加と逆の傾向である。

2）　加工油に黒鉛などを添加し，無添加のR砥石を使用して加工するとき，同様に $\triangle S$，$\triangle D$，R_a の低下がみられるので，上のこの3つの低下は潤滑効果によると思われる。境界潤滑膜によって切れ刃の食込みが妨げられる結果であろう。

3）　R_a を最小にする最適添加量があり，フッ化黒鉛の場合は少量となるが，他はほぼ5W％である。また，このときRH硬度と P_c もほぼ最大となった。

4）　MoS_2 を除く他の3つのものをレジンに添加して処理した砥石は，いおう処理砥石に代わる優れた代替品として使用できる。

5）　いおうに黒鉛を加えて処理すると，無添加の場合より切削性能，特に R_a が向上した。

参 考 文 献

1） 山本 明，上田隆司：固体潤滑剤添加による処理砥石の仕上性能向上について（第1報），精機学会昭和52年度関西地方定期学術講演会前刷，13.

2） 同上，（第2報），15.

3） 山本 明，上田隆司：固体潤滑剤添加によるホーニング用処理砥石の性能向上，精密機械掲載予定.

4） F. J.Clauss：Solid Lubricants and Self－Lubricating Solids, Academic Press, New York and Lond., (1972) 42.

5） F. P. Bowden and D. Tabor：The Friction and Lubrication of Solids, II, Oxford, Lond., (1964) 186.

6） たとえば，玉虫文一，他編：理化学辞典，岩波書店，(1974) 357.

7） 4）と同じ，75.

8） 4）と同じ，195.

9） 桜井俊男：潤滑の物理化学，幸書房，(1974) 95.

10） 渡辺信淳：弗化黒鉛，セラミックス，**4**，4 (1969) 301.

11） 渡辺信淳，高島正之：フッ化黒鉛の生成反応とその性質，有機合成化学，**31**，6 (1973) 455.

12） 高島正之，渡辺信淳：結晶性フッ化黒鉛の生成とその結晶構造，日本化学会誌，3 (1975) 432.

13） 渡辺信淳，喜田 康：フッ化黒鉛の熱分解，日本化学会誌11 (1975) 1896.

14） 9）と同じ，216.

第6章　針状砥粒の切削性能の検討とその利用[1),2)]

6.1.　はじめに

研削砥石に用いられる砥粒の形状は切れ味とか自生発刃作用などに関係する。一般に球形に近い砥粒は靱性が大きく，また，嵩比重も大きいという理由でよく用いられている。ここでいう針状砥粒はインゴット粉砕工程の初期に得られるもので，長短径比が大きく，鋭い切れ刃をもつ反面，その内部に亜結晶粒界，クラックなどの欠陥を数多くもつので，破砕しやすい欠点をもつ。これに対し，インゴットを十分粉砕して得られるいわゆる粒状砥粒は強度が大きい。普通に用いられる砥粒はこの混合物にあたる。

ここでは，ホーニング加工によって，針状砥粒のもつ鋭い切れ刃と破砕性が切削性能に及ぼす影響を粒状砥粒と比較して考察する。また，この砥粒のもつ特色を積極的に活用するために，難研削材への応用，およびいおう処理による破砕性の改善についても検討する。

6.2.　使用した砥粒および砥石と実験方法

表6−1に示す特別に作られたWA150の砥粒を用い，表6−2に示すようなほぼ等しい組織と硬さをもつビトリファイド砥石を作った。以下，表のように針状砥石および粒状砥石をSg砥石，Rg砥石と略記する。図6−1と表6−1から，針状砥粒は粒状砥粒に比べ鋭い切れ刃をもち，破砕しやすいことがわかる。また，嵩比重も小さい。

加工材料はS50C（Hv 199），SS41（142），ステンレス鋼SUS304（187），およびアルミニウム（28）の圧延丸棒あるいは押出丸棒を入手のままの材質で用いた。ステンレス鋼とアルミニウムおよびいおう処理砥石を採用したのは，針状砥粒の特性を活かすための応用分野をみいだすためである。

実験方法は3.2節と同様で，1本の砥石を用いて円筒外面を仕上げる簡単な方法によった。表6−3は実験条件で，実験Iでは加工時間の経過に伴う切

削状態の変化，実験Ⅱでは砥石圧力変化に伴う切削状態の変化を調べた。実験Ⅱによって砥石臨界圧力を求めることができる。

表6−1　砥粒の特性値（WA 150）

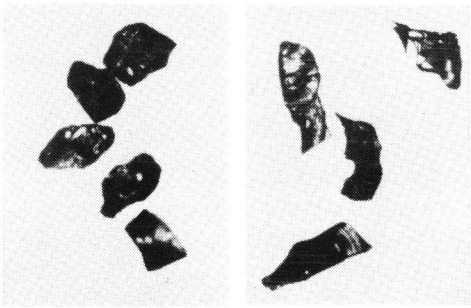
砥粒	砥粒径(μm)		長短径比		嵩比重	靱性係数
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		
粒状砥粒	148.7	22.82	1.56	0.417	1.85	87.9
常用砥粒	150.5	23.61	1.72	0.503	1.61	79.0
針状砥粒	157.8	23.27	1.93	0.723	1.51	71.0

備考：長短径比は写真撮影による。砥粒径としては長短径の平均値を用いた。靱性係数は鋼球を使用したボールミル法によった。

表6−2　供試砥石の組織と結合度

砥石 WA 150 L8V	組織 (%)			硬度 (RH)
	砥粒率	結合剤率	気孔率	
粒状砥石Rg	46.1	12.7	41.2	61.0
針状砥石Sg	45.6	12.6	41.8	60.5

備考：この砥石をいおう処理したRg(S)，Sg(S)のRH硬度はそれぞれ91.7，98.1である。重量測定によれば気孔の約83%をいおうが占める。



左：粒状砥粒，右：針状砥粒
図6−1　砥粒の形状

6.3. 加工進行に伴う切削状態の変化

図6−2はS50Cの場合である。$\triangle S$ は砥石損耗量，$\triangle D$ は仕上量，G は仕上比（$\triangle D/\triangle S$），R_a は平均仕上面あらさ，w は磁気的方法でインプロセス測定した[3]目づまり量である。

S_g 砥石の損耗量は R_g 砥石の約2倍もあり，普通鋼に対しては有効でないことがわかる。図から $L=90$ mと定め，砥石圧力 P_n を変化して臨界圧力 P_c を求めてみると，S_g 砥石で約4 kg/cm²，R_g 砥石で約7.6 kg/cm²

表6−3　実験条件

実験条件	記　号	実験 I		実験 II		
		a	b	a	b	c
加工物周速度	V_w (m/min)	24.5	9.9	8.9	8.8	8.2
砥石往復速度	V_s (m/min)	4.1	4.1	0.5	1.5	3.4
切削速度	$\overline{V}$ (m/min)	24.8	10.7	8.9	8.9	8.9
交さ角	θ (deg)	19	45	6	19	45
切削距離	L (m)	300	300	90	90	90
ストローク	S (mm)	100	100	30	30	30
オーバラン	a (mm)	30	30	10	10	10
砥石圧力	P_n (kg/cm^2)	3.2	3.2	—	—	—
加工物寸法	$d \times l$ (mm)	(40〜70)×140		(40〜70)×60		
砥石寸法	(mm)	10×10×100		10×10×50		

であったから，この実験で用いた砥石圧力 3.2 kg／cm^2 はそれぞれの P_c に比べて，Sg 砥石ではこれよりやや小さく，Rg 砥石では半分近い。これは，図の損耗量の差を幾分大きくするように働く。また，Sg 砥石の仕上量 $\triangle D$ が切削距離の増加に伴って頭打ちとならず増え続けるのは，この圧力の影響とあとで述べるように針状砥粒の破砕性に原因する。

目づまり量 w の曲線から Sg 砥石の作用切れ刃の間の空所には，Rg 砥石よりもやや多い量の目づまり金属が存在することが知れる。これは，破砕しやすいため切削に

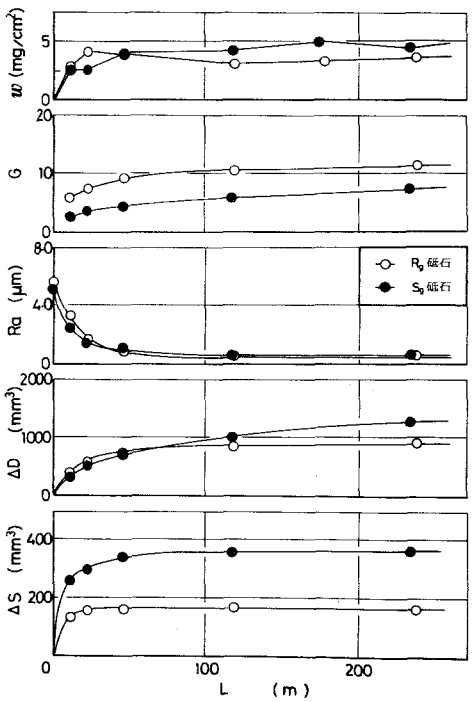


図6−2　実験条件 Ia，S50C における Rg，Sg 砥石の切削性能

あずかる切れ刃数が Rg 砥石よりも多くなりやすいこと，砥粒形状に原因して扁平状気孔が多く[4]，ここにはまり込んだ切りくずが容易に脱落しにくいことにも原因しよう。またSg 砥石で案外 R_a が小さいのも作用切れ刃数の多さと，これに伴う砥粒切込み深さの減少によるものであろう。

ところが，軟らかくて溶着性の著しいアルミニウムでは，図6−2と異なった状態がみられた。これは6.6.1節で述べる。

6.4. 臨界圧力に及ぼす影響と加工条件による特性の改善

3.3節で示したように臨界圧力 P_c は切れ刃の強さに関係しており，また生産性に関する尺度としても使える。ここでも P_c を $\triangle S-P_n$ 曲線を二つの折線に近似したときの折点として定める。超仕上の場合と同様[5]，砥石圧力 P_n が P_c 以上の時，目こぼれ型となるか目つぶれ型となるかでこの特性曲線の形は異なるが，一般に P_c 付近で仕上比 G は最大となる。

図6−3にみるように，S50CではSg 砥石の P_c の方がはるかに小さい。また，P_c 付近での切削性能を比較して，Sg 砥石は生産性・経済性の点でRg 砥石に及ばないといえる。

Sg砥石の $\triangle S$ が大きく P_c が小さいのは破砕しやすいためであるから，交さ角 θ を小さくして，前加工あらさ条痕（バイト目）に対する衝突角度を小さくすることによって砥粒切れ刃の切込み増加率を小さくしてやると，破砕性は改善される。すなわち，$\triangle S$ が減少し，図6−4にみるように P_c が大きくなってRg砥石に近づく。しかし，同時に $\triangle D$ も小さくなって生産性は下がる。

6.5. 破砕性質の特徴

$\triangle S-P_n$ 曲線の二つの近似直線の傾きを図6−5のように定義して，その変化を調べてみると，図のように P_c の上下の圧力で二つの砥石における直線の傾きの大きさ，すなわち損耗率の大きさが逆転する。一般的に，P_c 以下の砥石圧力では加工の続行に伴って作用砥粒は小破砕を伴いつつ摩耗すると

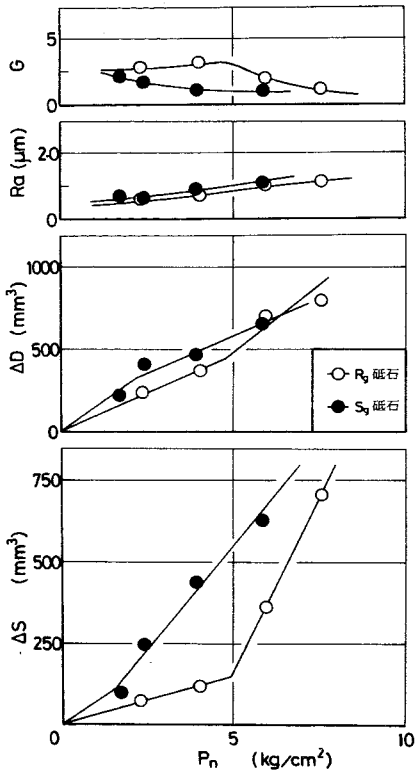


図6−3　実験条件 IIc，S50C における R_g，S_g 砥石の切削性能

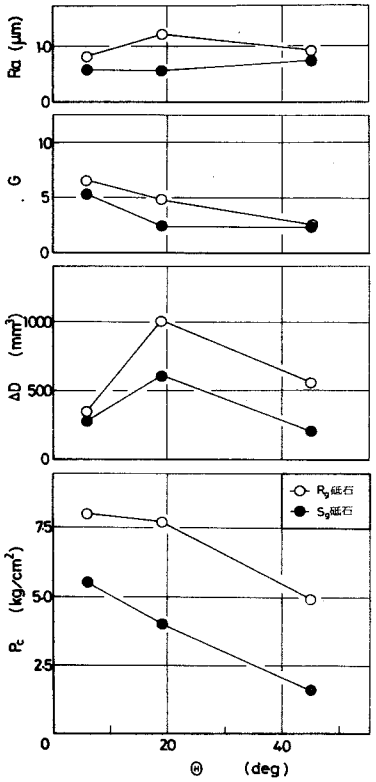


図6−4　交さ角の切削性能に及ぼす影響（実験条件 II，S50C）

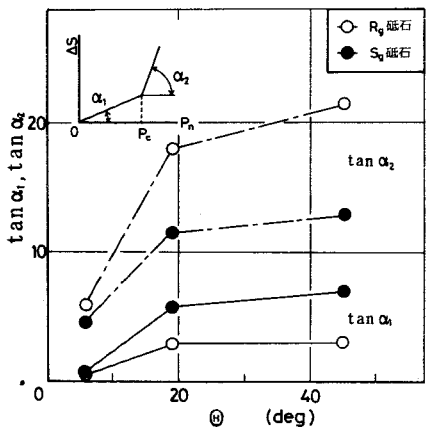


図6−5　R_g，S_g 砥石の $\triangle S-P_n$ 曲線の傾きの変化（実験条件 II，S50C）

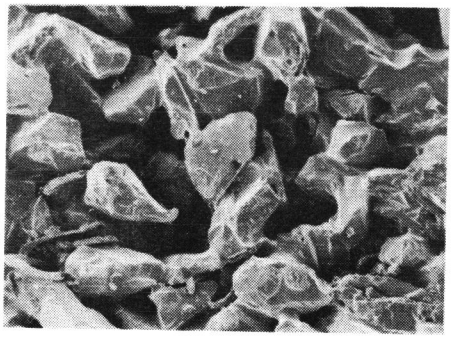
考えてよいが，図の様子から S_g 砥石は R_g 砥石よりも破砕を起こすことが多いと判断できる。一方，大破砕とか脱落を起こしやすい P_c 以上の圧力において，S_g 砥石の損耗率が R_g 砥石よりも小さいことは，S_g 砥粒が脱落を起こす前に破砕によって切削抵抗に対応するためであろうと考えることができる。

この様子を確認するために S50C を

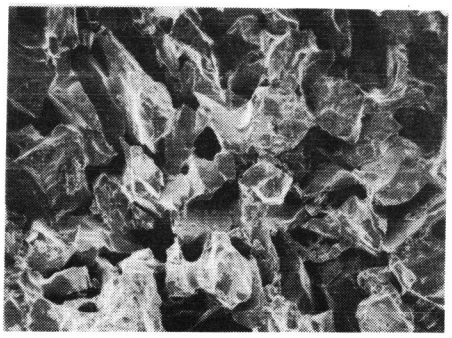
を用い，実験条件Ⅱb の下で，砥石圧力をRg および Sg 砥石の P_c（7.7 および 4.0 kg／cm²）よりも高く 9 kg／cm² にとり，適当な時間間隔で砥粒を加工油ごと採集し，これをアセトンで洗った後塩酸によって切りくずを除去し，それぞれ100個の砥粒についてその大きさ・形状を顕微鏡で観察してみた。砥石圧力が P_c の 2 倍以上であった Sg 砥石の方がはるかに脱落しやすいはずであるが，表6−4 にみるように平均径では逆に Rg 砥石よりもやや小さく，破砕で対応するものが多いことがわかった。Rg砥石でも P_n が P_c に近いせいもあって原粒のままというのではなく，平均径は原粒（約 150 μm）の 43 % 程度であった。また，Sg 砥粒の破片の長

表 6−4　砥石減耗粉の寸法
（実験条件 Ⅱb，P_n ＝9 kg／cm²，S50C）

砥石	採集した切削距離区分（m）	砥粒寸法（μm）		長短径比	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
Rg	0 ～ 8.9	53.6	29.9	1.55	0.40
	8.9 ～ 17.8	64.0	21.1	1.54	0.39
	35.6 ～ 44.5	61.7	20.3	1.54	0.37
	80.1 ～ 89.0	65.0	27.0	1.55	0.41
Sg	0 ～ 8.9	54.1	20.1	1.57	0.37
	8.9 ～ 17.8	54.1	25.5	1.58	0.45
	35.6 ～ 44.5	52.1	15.9	1.63	0.48
	80.1 ～ 89.0	52.2	19.4	1.60	0.36



Rg 砥石



Sg 砥石

写真の大きさは左右 700 μm

図 6−6　砥石作業面の状態（実験条件 Ⅱb，P_n ＝9 kg／cm²，S50C）

短径比は原粒の約 1.9 に対し 1.6 程度であった。

一方，砥石表面側からこの様子を走査電顕で調べた結果の一例が図6−6 である。これは表6−4 の $L=89$ m における砥石作業面を観察したもので，アセトンで加工油を洗浄し真空炉中で加熱乾燥する検鏡試料調製過程で，脱落した切りくずが多いと思われるが，写真を比較して Rg 砥石よりも Sg 砥石の方がはるかに砥粒破断面が多く，鋭い切れ刃が多くできやすいこと，残留切りくずが多いことが認められる。

6.6. 針状砥粒の活用法の検討

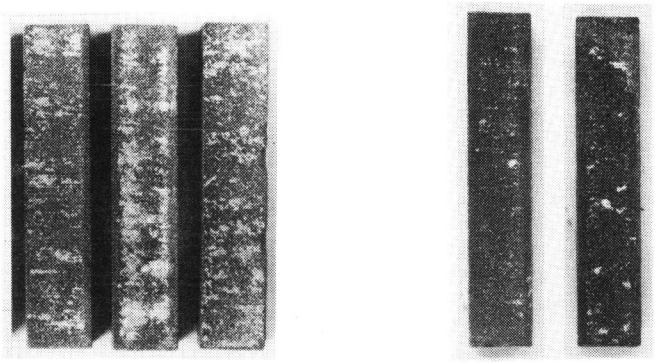
以上で，針状砥粒は破砕性が強いために，期待した鋭い切れ刃による切削性の増大を得ることができないことがわかった。そこで，破砕性における上記の特徴を活した利用法として，溶着性の強い材料への応用を検討してみた。また，いおう処理によって砥粒を補強したときの効果についても調べた。

6.6.1. アルミニウム加工への応用

軟らかく粘い純アルミニウムは溶着性が強いため目づまりが著しくて，加工性，特に仕上面が悪く，難研削材であることはよく知られている。これに破砕性の強い針状砥粒を用いると，破砕に伴う自生作用による目づまり金属の除去に期待がもてる。

図6−7 (a)は砥石圧力 P_n を変化して $L=90$ m における砥石表面の目づまり状態を観察したものである。P_n が大きくなるほど目づまり量は増大し，$P_n=6.2$ kg／cm^2 では目づまり金属がところどころに大つぶ状に堆積硬化しており，これが加工面を傷つける。従って，アルミニウムの加工では仕上面のあれを考えると，P_c よりも目づまりに対する P_n の制限が重要になる。

図6−8 は加工時間に伴って変化する切削状態を調べた結果で，多量の目づまりの発生を防ぐために $P_n=1.1$ kg／cm^2 とし，また破砕性を強調するために $\theta=45°$（条件 $\mathrm{II_C}$）を採用した。仕上面は加工時間と共に全体的には向上



(a) Sg砥石，$\theta=6°$，P_n は左より 2.4，4.2，6.2 kg／cm^2

(b) 左：Sg 砥石，右：Rg 砥石 $\theta=45°$，$P_n=1.6$ kg／cm^2

$L=90$ m，砥石の長さ：50mm

図 6−7　アルミニウムの加工における目づまり状態

していくが，前にみた鋼と異なり，Sg 砥石では切削距離 20 m, Rg砥石では 5 m程度を超えると仕上面にわずかな線状のむしれを生じ始める。さらに切削が進むと，砥石表面の目づまりは選択的に大つぶに発達し，これによって仕上面には多数のむしれを生じ，ついには作業不能となる。図6−7(b)のように，Rg砥石では Sg 砥石よりも多数の大つぶの目づまりがみられる。従って，アルミニウム加工では，P_n のほか加工時間（切削距離）の選択も重要な条件となる。

図6−8 をみて，Sg 砥石の方が仕上量，経済性，仕上面において，

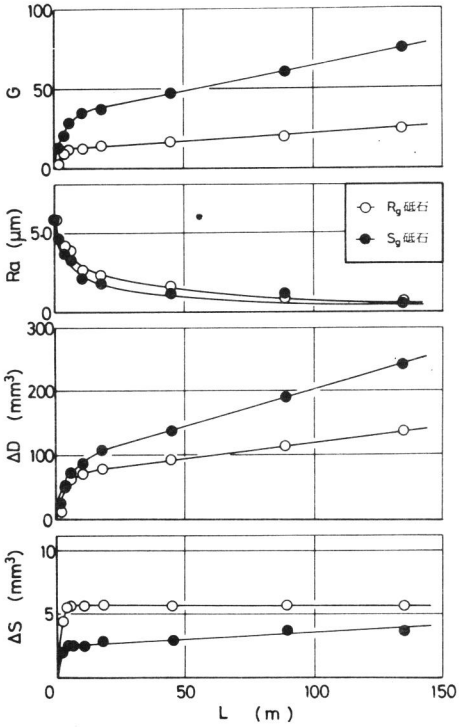


図 6−8　アルミニウム，実験条件 IIc，$P_n=1.1$ kg／cm^2 における Rg，Sg 砥石の切削性能

明らかに優れる。仕上面あらさ R_a は線状となったむしれ部分を外して測定したあらさであるが，これも早い段階で向上している。

これらは針状砥粒の破砕強さが切削抵抗の小さいアルミニウムにうまく適合しており，むやみと破砕せず，また破砕の際溶着切りくずも適当に除去され，さらに生じた多数の鋭い切れ刃が有効に作用するためと考えられる。

6. 6. 2. 砥石のいおう処理による破砕性の改善

表6−2の砥石をいおう処理（以下，記号(S)で表示）して用いる。処理に伴い気孔率は大きく減少し，また表に付記するようにRH硬度は増大してみかけの結合度が硬くなる。

例として，軟鋼（SS41）の加工に応用したときの改善効果を図6−9に示す。処理に伴い，P_c は上昇し，砥石損耗量 $\triangle S$ は減少し，仕上比 G も上昇する一方，仕上面あらさ R_a も改善される。すなわち，仕上能率と経済性が大いに増す。

S_g 砥石における改善は著しく，特に P_c の増大が目立ち，R_g(S)砥石に近づく。気孔をいおうが充塡することによって，破砕しやすい砥粒を補強したためである。それでも図を一覧して，切削性能としては R_a を除いて S_g(S)砥石は R_g(S)砥石に及ばないことがわかる。また，処理に伴って，P_c

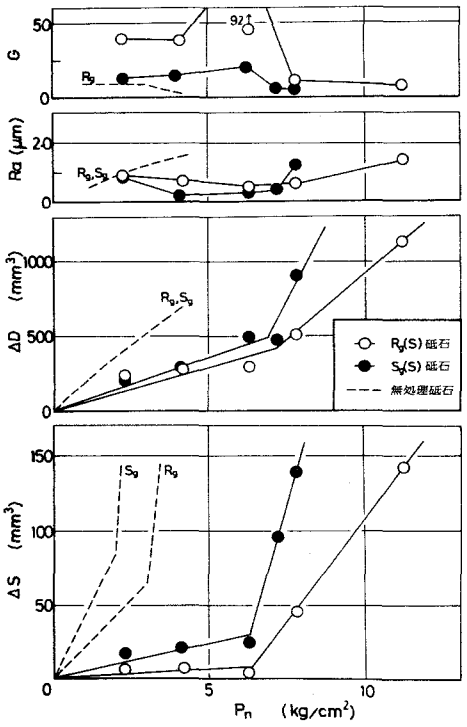


図6−9　SS41，実験条件IIcにおける R_g(S)，S_g(S)砥石の切削性能

以上の勾配 $\tan\alpha_2$ は脱落・破砕を抑制された R_g(S)砥石の方が小さくなっている。

6.6.3. オーステナイト系ステンレス鋼の加工への応用

SUS304 も溶着性が強く，難研削材に属する。この場合も，砥石をいおう処理することによって，図6−10にみるように切削性能は大いに改善される。砥石損耗量曲線において，P_c は明瞭に出ていないが，S_g(S)砥石で約2.5kg／cm^2，R_g(S)砥石で約4kg／cm^2 と想像される。これは前図の軟鋼に比較してかなり低い。また P_c 以上の圧力では，砥石圧力の増加に対して $\triangle S$ や $\triangle D$ は軟鋼の場合ほど増加せず，高い圧力では頭打ちとなっている。これは目づまりとこれに伴う目つぶれ現象が著しいためであり，10kg／cm^2 以上では，目づまり金属付着のため $\triangle S$ は減少すらしている。S_g(S)砥石が多少とも損耗が大きいことは，切れ刃更新となって $\triangle D$ を幾分増加させているが，$\triangle D$ は軟鋼の場合の1/2程度にすぎない。それでも，P_c 付近で加工するときの仕上比 G は無処理砥石を使用して軟鋼を加工するときよりも大きい。また，P_c 以上の砥石圧力でも仕上面の悪化が著しくないので，砥石圧力を上げて生産性を増すこともできる。

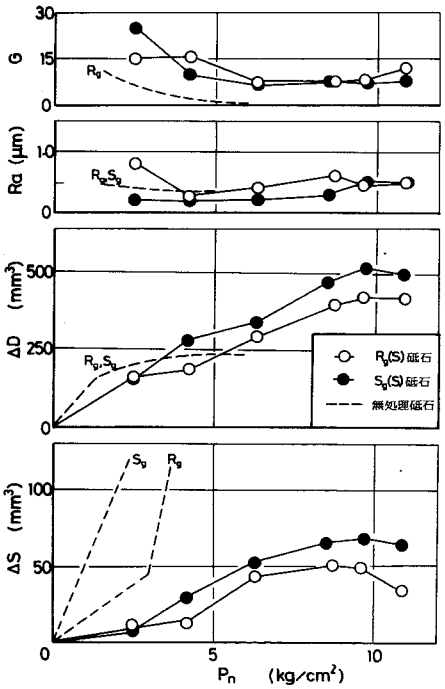


図6−10　SUS304，実験条件IIc における R_g(S)，S_g(S)砥石の切削性能

S_g(S)砥石と R_g(S)砥石の優劣は評価観点で異なろうが，生産性と仕上面の点では S_g(S)砥石の方がまさる。

このようにステンレス鋼においても，アルミニウムの場合ほど著しくはないが，針状砥粒は利用価値のある砥粒といえる。

6.7. 本章の結論

以上，針状砥粒の切削性能とその利用について検討した結果をまとめると，次のようになる。

1） 針状砥粒は破砕しやすいので，砥石損耗量が多く，臨界圧力 P_c も低くて，生産性と経済性から考えて，普通鋼の加工ではその鋭い切れ刃による切削性を活かすことができず，メリットはない。

2） 普通鋼では，針状砥粒は P_c より砥石圧力が大きくなっても，切削抵抗に対して脱落とか大破砕を起こす以前に破砕で対応するので，S_g 砥石は R_g 砥石よりも圧力増加に対する損耗量の増分が少ない。

3） 普通鋼では，S_g 砥石はみがき作業に移る仕上期でも切削を伴う。仕上面あらさは切れ刃数が多いため R_g 砥石と同程度か，むしろ小さい。

4） 普通鋼では，交さ角を小さくすることによって針状砥粒の破砕性を抑えることができ，R_g 砥石との性能の差を少なくできるが，仕上量が少なくなる。

5） いおう処理によって砥粒を補強すると，S_g 砥石では破砕性が抑えられ切削性能が大いに改善されるが，普通鋼では同様に処理した R_g 砥石に比べるとわずかに劣る。

6） 針状砥粒はその破砕性を活して溶着性の強い難研削材の加工に利用でき，効果もある。アルミニウムの加工では S_g 砥石は R_g 砥石よりも大いにまさるが，砥石圧力と切削時間の選定が重要である。SUS304ではいおう処理砥石とすることによって性能が大いに改善される。
S_g(S) 砥石と R_g (S) 砥石との優劣は評価の立場で異なろうが，生産性と仕上面あらさの点では S_g (S) 砥石の方がまさる。

参　考　文　献

1）　山本　明，松森　昇，上田隆司：針状砥粒のホーニング加工における切削性能の検討とその利用，精密機械，**42**，3(1976) 178.

2）　A.Yamamoto, N.Matsumori and T.Ueda : Cutting Characteristics of Splintery Grains and Its Utilization — Investigation by Honing, Bull. Japan. Soc. of Prec. Engg., Vol1. **11**, No. 2 (June 1977) 85.

3）　山本　明，前田良昭，生田　潔：ホーニング仕上過程における目づまりのインプロセス測定，精密機械，**38**，6 (1972) 518.

4）　山本　明，松森　昇：ビトリファイド砥石の強さ，とくに静疲労強さについて（第2報），精密機械，**40**，11 (1974) 1018.

5）　松森　昇，山本　明：マルテンサイト系ステンレス鋼の超仕上加工，精密機械，**40**，7 (1974) 598.

7. 総　　括

本研究は，ホーニング加工や超仕上加工でその優れた性能のゆえに常用されているいおう処理砥石について，その気孔中に充塡されているいおうの切削性能への貢献機構を明らかにし，いおうに代わる優秀な代替品を見い出す手掛りを得ることによって，ホーニング砥石の切削性能を向上させることを目的とした。また，砥粒形状の面からも切削性能の向上を試みた。

まず，第2章では，これまで経験的に行われてきたいおうの充塡方法について検討を加えた。一般に，いおう処理は加熱砥石をいおう融液中に浸漬し，毛管作用を利用して砥石気孔中に充塡するので，気孔を直管毛細管とみなす等価モデルを考え，管中を上昇する液体の運動を与える一般式を導き出した。この式の変数は液体のぬれ角，表面張力，粘性係数，比重，上昇高さ，および等価管径である。実験結果より求めた等価管径は気孔の複雑さを含んでおり，砥石構造，特に粒径のみでほぼ決まり，液体の性質には無関係である。いおう処理では，液体の粘性が最小になる150°C付近で，250°C以上に初期加熱された砥石に充塡するとき，充塡時間が最小となる。250°C以上の加熱がよい結果を与えるのは，雰囲気からの吸着成分が除去されるためと考えられる。

次に，第3章では，ホーニング加工を行うことによって，先ず優れた切削性能を得るための切削条件を調べた。その結果をまとめると次のようになる。砥石の切削性能は臨界圧力を境にして大きく変化し，一般の加工では砥石圧力を臨界圧力よりやや小さな値とするのが得策である。いおう処理砥石は，粘性が小さくなる145°C付近の溶融いおうを充塡した砥石において，最も充塡むらが少なく，優れた切削性能を示す。しかし，溶媒の二硫化炭素にいおうを溶して充塡した砥石では，充塡量が少な過ぎるため，切削性能はほとんど改善されない。従って，第2章における結果と合わせると，145°C～150°C付近の溶融いおうを充塡するのが最適である。また，砥石には加工条件に

合った適切な結合度，およびいおう処理した効果が最もよく現われる結合度がある。そこで，この結果を基本に，いおうのほかパラフィン，ステアリン酸，植物性ワックス，塩素化パラフィン，フェノール樹脂を充塡した処理砥石を用いて加工し，それらの切削性能を調べることによっていおうの働きに検討を加えた。その結果，臨界圧力，仕上量，仕上比の上昇は処理剤による砥粒補強に大いに関係しており，その融点ないしは耐熱温度が砥石作業面平均温度よりも高いことが必要であると考えられる。すなわち，切削熱によって処理剤が溶融するパラフィン，ステアリン酸，植物性ワックス処理砥石では処理剤の補強効果はなくなり，これらの値の上昇はほとんど得られないが，いおうの場合には融点が高く，臨界圧力や仕上比が大きくなる。また，フェノール樹脂も耐熱温度が高いため補強効果があり，臨界圧力，仕上量，仕上比が大きく上昇する。一方，融出したステアリン酸や植物性ワックスの潤滑効果およびいおうの極圧添加剤としての働きによって，これらの処理砥石では仕上面が向上するが，潤滑性能の悪いフェノール樹脂では仕上面は悪くなる。

そこで，第4章では，処理剤の働きについてさらに詳細な検討を加えるため各処理砥石の曲げ強さ，引張強さ，引っかき強さ，目づまり量，および熱伝導率を測定した。その結果をまとめると次のようになる。砥石のような多孔質材では，砥石よりもはるかに強さの小さい処理剤でも気孔中に多量に充塡すれば，曲げ強さや引張強さが大きくなり，処理剤は補強材として働く。処理剤が切削時に補強効果を示すには，その融点が砥石作業面平均温度よりも高いことが必要であり，このことがいおうが優れた性能を示す一原因となっている。処理砥石では処理剤の目づまり抑制効果によって目づまり量が大幅に減少するが，無処理砥石では目づまり量が多く，目づまりによる砥粒補強が臨界圧力を大きくする一原因となっている。また，無処理砥石では目づまり量の増大と共に仕上面あらさが向上するが，有効な処理砥石では目づまり量が仕上面あらさと無関係で，むしろ固形処理剤が目づまりの代わりをし，

その潤滑効果も手伝って優れた仕上面を作り出す。一方，無処理砥石に比べ，いおう処理砥石の熱伝導率は２０％程度大きいが，加工油に浸すといずれの砥石もほぼ同程度となり，いおう処理による放熱効果の向上は失なわれてしまう。

以上の結果より，ホーニング砥石用処理剤として具備すべき条件は次のように与えられる。

1）　補強効果があり，かつ融点が高く，切削熱によって溶融しないもの。

2）　潤滑性のあるもの。

3）　切りくずと付着しにくく，目づまり抑制効果のあるもの。

4）　化学的に安定なもの。

5）　処理しやすいもの。

このうち，臨界圧力，仕上量，仕上比の上昇には１）が最も重要であり，仕上面向上には２）と３）が必要である。これらがいおうが優れた性能を示す原因でもある。

この結果をもとに，第５章では，補強効果のみ著しいフェノール樹脂に黒鉛，二硫化モリブデン，テフロン，フッ化黒鉛を添加した処理剤を作り出し，その効果を調べると共に，処理剤の潤滑性能が切削性能に及ぼす影響について検討を加えた。また，黒鉛を添加することによっていおう処理砥石の改善を試みた。その結果，固体潤滑剤を添加したレジン処理砥石では，処理剤の潤滑性能が向上するため臨界圧力や仕上比が大きくなると共に，MoS_2添加の場合を除き仕上面あらさが小さくなり，いおうの代替品になりうる優れた切削性能を示す。しかし，最適添加量があり，添加量を多くし過ぎると補強効果が低下し，切削性能は悪くなる。一方，黒鉛を添加したいおう処理砥石では，仕上比が大幅に大きくなると共に仕上面が向上する。また，難研削材であるアルミニウムの加工にも優れた切削性能を示す。

従って，適切な固体潤滑剤を適量添加したレジンは先の条件のうち１）～４）を満足し，優秀な処理剤と考えられるが，５）の条件に関してはいおう

に劣り，この点が今後の課題である。

最後に，第6章では，砥粒の形状が標準のものよりも細長く，しかも破砕性に富んでいる針状砥粒を用いて，ホーニング砥石の切削性能の向上を試みた。その結果，針状砥粒は破砕しやすいので，砥石損耗量が多く，臨界圧力も低くて，普通鋼の加工ではその鋭い切れ刃による切削性を活かすことができない。しかし，目づまりが著しいため難研削材であるアルミニウムに対しては，破砕に伴う自生作用によって溶着切りくずを適切に除去することができ，仕上量，仕上比，仕上面あらさにおいて非常に優れた切削性能を示す。また，針状砥粒をいおう処理することによって補強すると，破砕性が抑えられて切削性能が大いに改善され，特に，難研削材であるSUS304の加工では，仕上量と仕上面あらさの点で同様に処理した粒状砥粒よりもまさる。

謝　　辞

本研究を行うに際し，終始御懇切な御指導と御鞭撻を戴いた，大阪大学教授　山本　明先生に深く感謝いたします。

また，有益な御助言を賜った，大阪大学教授　佐賀二郎先生，ならびに林　卓夫先生に厚く御礼申し上げます。

さらに，砥石および加工油の提供を受けた瑞穂研磨砥石K.K.，および日本グリースK.K.に深謝すると共に，実験に協力して下さった本研究室の中村示助手，前田良昭助手をはじめとする皆様に厚く御礼申し上げます。