



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	弾性砥石による鏡面仕上の研究 : 仕上面性状と加工条件について
Author(s)	三好, 隆志; 斎藤, 勝政
Citation	北海道大學工學部研究報告, 120, 33-44
Issue Date	1984-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41863
Type	departmental bulletin paper
File Information	120_33-44.pdf



弾性砥石による鏡面仕上の研究

——仕上面性状と加工条件について——

三 好 隆 志 齋 藤 勝 政

(昭和58年11月30日受理)

Study on Mirror-Finishing by an Elastic Grinding Wheel

—Relations between Finished Surface
Properties and Grinding Conditions—

Takashi MIYOSHI and Katsumasa SAITO

(Received November 30, 1983)

Abstract

It is well known that the PVA sponge wheel (a kind of elastic grinding wheel) is a very efficient tool for mirror-finishing of soft metals and difficult cutting materials because of its particular elastic deformation. The mirror-finishing of soft metals (Al 24 S, 4-6 Brass) and hard metals (SUS-27, S 55 C) are performed by using the device based on the principle of superfinishing to obtain the relations between the finished surface properties (surface roughness and specular reflection) and the grinding conditions.

The following results are obtained :

- (1) The surface properties finished with C-abrasive grain is better than those finished with WA-grain. Especially, C-grain improves on the surface roughness of soft metals.
- (2) The finished surface properties have a tendency to be better with the increase of grinding speed. The grinding speed of about 450 m/min is suitable for the soft metals, while that of about 250 m/min is suitable for the hard metals.
- (3) The finished surface properties are better for each material when the applied load is 0.1 MPa (about 1 kg/cm²).
- (4) The PVA sponge wheel can finish the surface of each material to a mirror surface of less than 0.3 μm R_{max}, when the grinding length is about 150 m.

1. 緒 言

鏡面とよばれるような面は、光の半波長 ($0.3 \mu\text{mR}_{\text{max}}$) 以下の粗さからなり、高い光沢を示し、一般に耐摩耗性、耐食性という点でも優れ、さらに加工変質層の少ない材質的にも優秀な面である。このように金属表面を鏡面に仕上げることは工業上重要なことであり、その加工法は、加工物の形状、材質、寸法精度に応じて種々あるが、多くの場合、砥粒加工によっている。

砥粒の摩擦、摩耗の理論およびポリシング機構については、Bowden による詳細な研究報告¹⁾

があり、砥石による代表的な鏡面仕上加工法である超仕上については、Swigert, 浅枝, 井上, 松井²⁾らによって研究されている。これらの研究に用いられた砥石の多くはビトリファイド砥石であり、被削材は鋼のような比較的硬い金属に限られていた。とくにビトリファイド砥石は軟質金属やステンレス鋼のような難削材の鏡面仕上には不適であり、このような材料の鏡面仕上には弾性砥石とよばれる PVA 砥石が用いられている。PVA 砥石は Poly Vinyl Alcohol をアセタール化した縮合樹脂発泡体を結合剤としており、この結合剤の特異な変形挙動によって光沢の高い鏡面が得られるものと考えられている³⁾。しかし PVA 砥石による鏡面仕上の加工条件、またその鏡面仕上機構に関する研究⁴⁾は少なく、不明な点が多く残されている。

そこで本研究では、軟質金属であるアルミニウム合金 (Al24S), 4-6 黄銅, 難削材であるステンレス鋼 (SUS-27), 比較的硬質な高炭素鋼 (S55C) と性質の異なる金属材料を被削材として用い、超仕上の原理に基づいて鏡面研削実験を行ない、研削面の仕上面粗さと光沢の測定から仕上面性状を評価し、鏡面を得るための加工条件を求めると同時に PVA 砥石の研削特性およびその鏡面仕上機構について検討したので報告する。

2. 実験方法

平形 PVA 砥石の端面を用いた定荷重、往復運動方式によって鏡面研削実験を行なった。実験装置 (図 1) には牧野フライス社製 NC 立フライス盤 (KHNC P-70) を用い、ベシト上に被削材保持具と一体になっている荷重装置と、研削液供給装置を固定した。一方 NC 立フライス盤主軸に平形 PVA 砥石を接着したアルミニウム製円板を取付け、広範囲に可変な主軸の回転運動に加えて、NC 制御装置による Y 軸方向の往復運動を主軸に与えた。

実験条件は表 1 に示す通りである。また実験手順は次の要領で行なった。被削材をエメリーペーパーで一方の条痕が残るように仕上げて前加工面を作り、小坂式 SE-3 型粗を計で条痕と直角方向の粗さ断面曲線をと、次に試作したファイバオプティクス光沢計^{5~6)}で光沢を測定した。本光沢計はオプティカルファイバを利用したもので、白熱電球からオートコリメータ

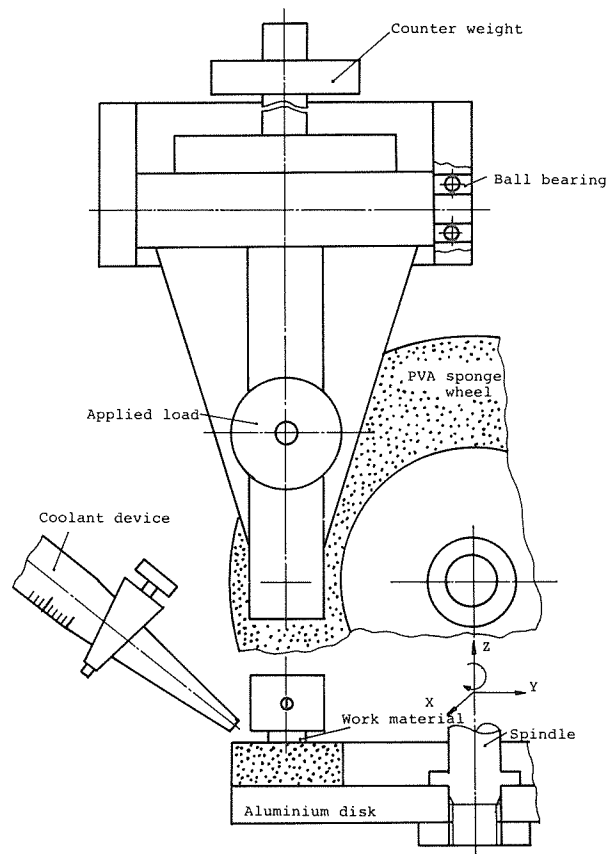


Fig.1 Set up for obtaining the mirror surfaces by PVA sponge wheel

を通して平行光線とし、この光束を入射光ファイバ束を通して試料表面に垂直に照射し、仕上面からの正反射方向の反射光を受光ファイバ束で受け、その強度を光電導素子 Cds で電流に変換し、記録計で読みとるものである。

Table 1 Experimental conditions

	Al24S	4-6Brass	SUS-27	S55C
PVA sponge wheel	C, WA400S ₁	C, WA400S ₁	C, WA400S ₁₀₀	C, WA400S ₂
	(φ100×10×φ50 wheel)			
Grinding speed	113-754m/min			
Grinding time	5-40 sec			
Applied load	0.05-0.15MPa (0.5-1.5kg/cm ²)			
Coolant	kerosene (100cc/min)			
Feed rate in Y-axis direction	0.72m/min (10mm reciprocal motion)			
Work dimensions	φ11.3×15 (1cm ²)			
Pre-ground surface roughness	1.5 μmR _{max} (#600 emery paper)	1.2 μmR _{max} (#400 emery paper)	1.0 μmR _{max} (#320 emery paper)	1.0 μmR _{max} (#320 emery paper)
Dressing	Single point diamond 10 μm×5times			

前加工面の光沢を測定した後、前加工面の条痕が研削方向とほぼ一致するように被削材を保持具に固定し、平衡荷重をとり、研削面を砥石面に合せてから所定の荷重を加え、水準器により水平度を確認し一定時間の研削を行なった。仕上面については、条痕に垂直方向の粗さ断面曲線から仕上面粗さ R_{max} を求め、また光沢の測定を行なった。さらに研削前と研削後の試料の重さを 0.01mg まで測定可能な直示天秤で測定し、研削量を研削深さ (μm) に換算して求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 仕上面性状と加工条件

ビトリファイド砥石 (Vit.砥石) を用いた超仕上において、ある圧力以上になると砥石減耗が急増するいわゆる臨界圧力³⁾が存在し、この臨界圧力以上では良好な仕上面を得ることができない。そこで PVA 砥石においても良好な仕上面を得るための砥石圧力を選定する必要がある。

図2は各被削材における砥石圧力 P と仕上面粗さ R_{max} および光沢 I の関係である。被削材によって若干の違いはみられるが、0.1MPa (1 kg/cm²) 程度の砥石圧力で粗さ、光沢ともに良い

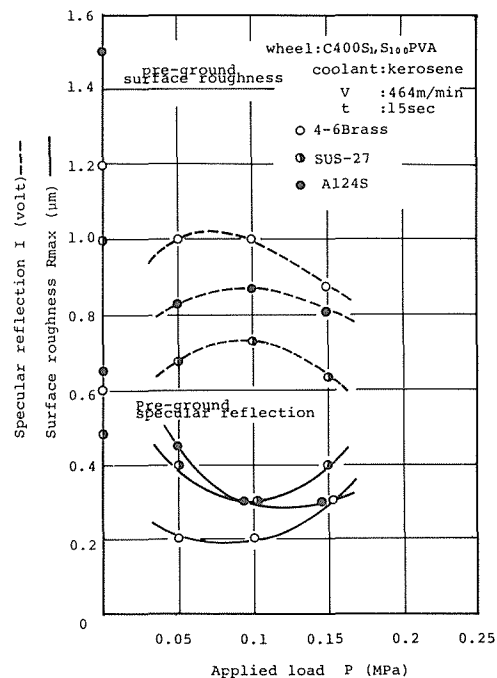


Fig.2 Relations between applied load and finished surface properties

値を示している。これは Vit. 砥石と同様な一種の臨界現象と考えられ、砥石圧力が小さすぎると、切削能力の小さい PVA 砥石では前加工面の粗さを完全に除去できず、また圧力が大きすぎると研削抵抗が大きくなるばかりでなく、研削熱の増大によって軟化温度の低い PVA 結合剤の結合力は弱くなり、砥粒の脱落が急増し、仕上面が劣化する。したがって良好な仕上面を得るためには、 1 kg/cm^2 程度の砥石圧力 (Vit. 砥石においても $P=0.5\sim 1.5\text{ kg/cm}^2$ で鏡面が得られている²⁾) が適当であり、以下の実験においてこの砥石圧力を用いた。

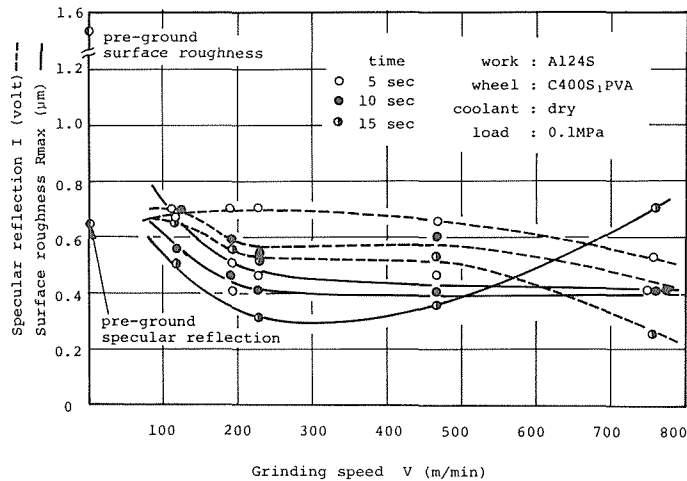


Fig.3 Relations between grinding speed and finished surface properties in the absence of coolant

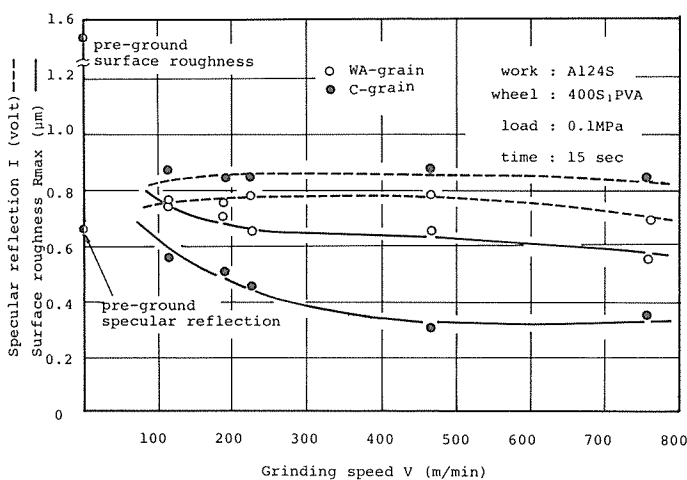
次に Al24S を例にとって、研削液を使用しない場合の研削速度 V と仕上面粗さ $R_{\max}$ および光沢 I の関係を、研削時間 T をパラメータにとって図 3 に示した。研削速度が 250 m/min 程度になるといずれの研削時間においても粗さはほぼ改善され、 $T=15\text{ sec}$ では $0.3\mu\text{m}R_{\max}$ 以下の小さな粗さが得られている。しかしそれ以上の速度になると逆に劣化している。また光沢は速度の増加とともに減少し、研削時間が長いほどその傾向は著しい。これらの要因として、乾燥の場合、研削速度が増加し、長時間の研削になると研削温度が高くなり、PVA 結合剤は軟化して溶着するため光沢は減少した粗さも劣化するものと考えられる。以上のことから、良好な仕上面を得るためには研削液の供給が必要であり、以下の実験では灯油を用いた。

図 4 は C および WA 砥粒について各被削材における研削速度 V と仕上面粗さ $R_{\max}$ および光沢 I の関係を示している。(a), (d) は Al24S, 4-6 黄銅の軟質金属, (c), (b) は SUS-27, S55C の硬質金属の場合である。軟質金属の場合、仕上面粗さは C, WA 砥石ともに $V=450\text{ m/min}$ 以上になるとほぼ一定になっている。また粗さの改善度は C 砥粒のほうがすぐれており、例えば $V=464\text{ m/min}$, $T=15\text{ sec}$ で、Al24S は $0.3\mu\text{m}R_{\max}$, 4-6 黄銅で $0.2\mu\text{m}R_{\max}$ の良好な仕上面になっている。

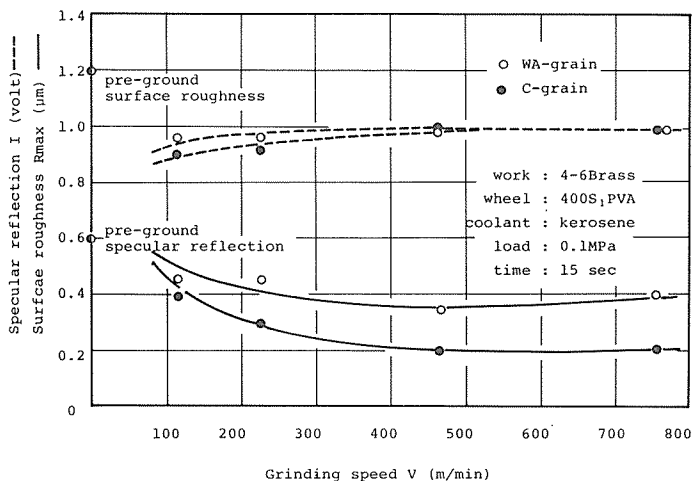
光沢は C, WA 砥粒ともに $V=450\text{ m/min}$ 程度で最大となり、前加工面の光沢と比較するとかなり改善されていることから、研削液の冷却効果が大いことがわかる。また C 砥粒のほうが光沢の改善に適しており、とくに Al24S については顕著である。アルミニウム合金のようにねばりのある金属は切屑が砥粒切刃に溶着しやすくまた目づまりが生じやすいため、鋭い切刃をもち、へき開性の大きな切削性の良い C 砥粒のほうが鏡面仕上に適しているものと考えられる。

以上の結果から、軟質金属にはC砥粒が適していること、灯油を用いることによって光沢が改善されること、研削速度は450 m/min程度が適当であり、15 sec程度の研削時間で迅速に鏡面が得られることがわかる。

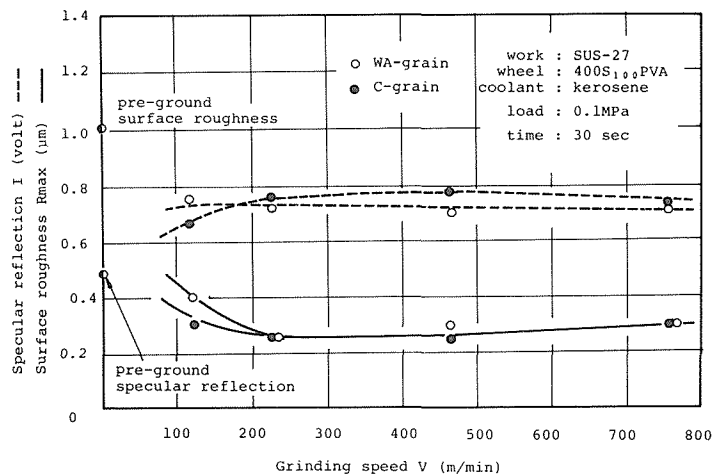
硬質金属の場合、仕上面粗さはC、WA砥粒ともに $V=250$ m/minになるとほぼ改善され、 $V=226$ m/min, $T=30$ secでいずれの被削材も $0.25\mu\text{m}R_{\text{max}}$ の小さな粗さが得られている。光沢は仕上面粗さと同様に $V=250$ m/min程度で最大となり、それ以上速度を増加すると逆に減少する傾向がある。とくにS55CのWA砥粒の場合、その傾向が強く、C砥粒のほうが光沢の改善に適している。



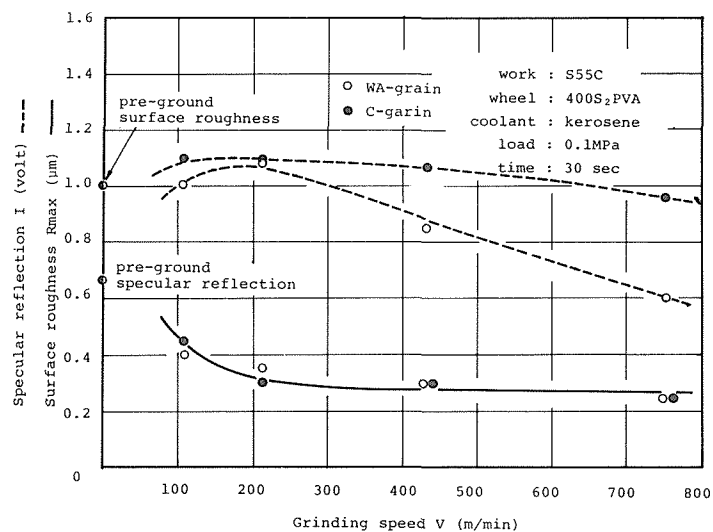
(a) A124S



(b) 4-6Brass



(c) SUS-27



(d) S55C

Fig.4 Relations between grinding speed and surface finished properties of some different kinds of materials in the presence of coolant

以上の結果から、軟質金属の場合ほど明確ではないが、C砥粒が仕上面性状の改善に適し、また研削速度 250 m/min, 30 sec の研削時間で硬質金属を鏡面仕上できることが分かる。軟質金属

の場合と異なるのは、研削速度が約1/2の低速になっていることで、これは研削長さ L ($V \times T$) が同程度でも、高速になると研削量が減少するため硬質金属には前加工面の粗さを完全に除去できる比較的低い速度が適しているものと考えられる。

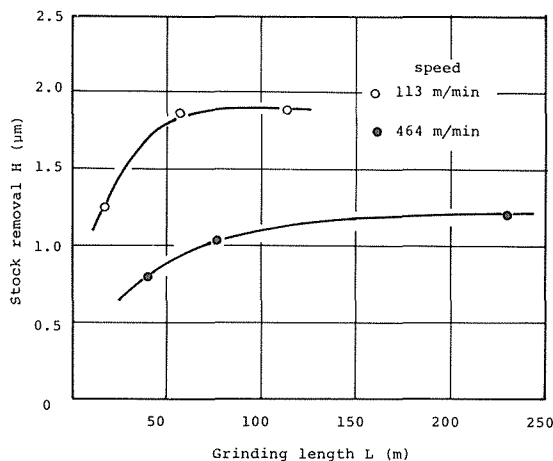


Fig.5 Relations between grinding length and stock removal

図5はS55Cを例にとって、研削長さ L と研削量 H の関係を示したものである。研削長さが同じであっても低速になるとあきらかに研削量は大きくなり、 $L=100\text{m}$ で、 $V=464\text{m/min}$ の場合 $H \approx 1\mu\text{m}$ であるが、 $V=113\text{m/min}$ の低速では $H \approx 2\mu\text{m}$ と2倍になり前加工面の粗さはほぼ完全に除去される。

Table 2 Micro-Vickers hardness and stock removal

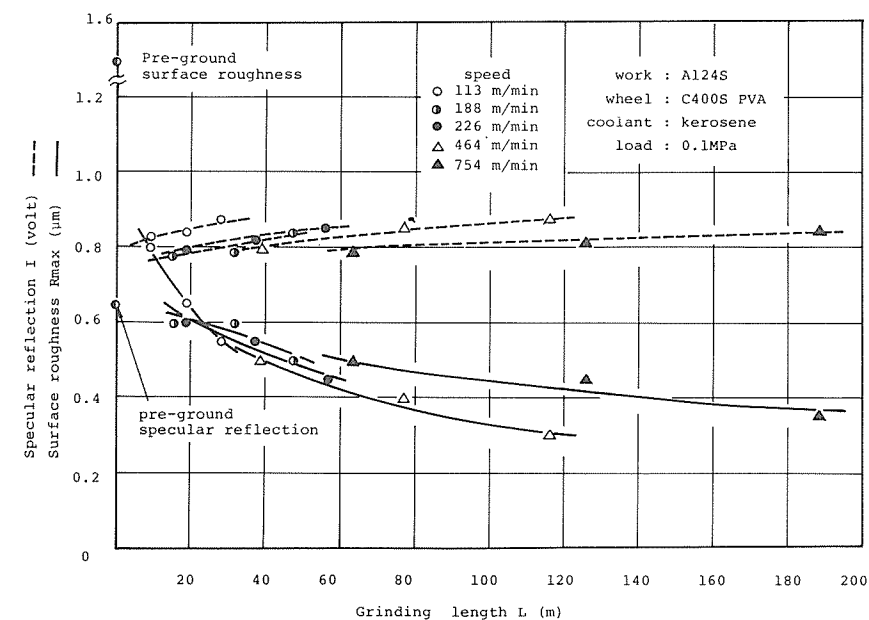
Micro-Vickers hardness Hv	148	137	362	260
Stock removal (μm)	8.2	9.3	1.2	1.4

表2には各被削材のマイクロビッカースかたさ Hv と研削量 H を示した。研削長さはいずれの場合も120mで、研削速度は軟質金属で464m/min、硬質金属で226m/minである。軟質金属の研削量は8～9.5 μm と大きい、硬質金属では1～1.5 μm と小さな値を示している。したがって前加工面粗さが仕上面に与える影響を考慮する必要があり、前加工面粗さが大きいときは、低速で長時間の加工が必要となる。

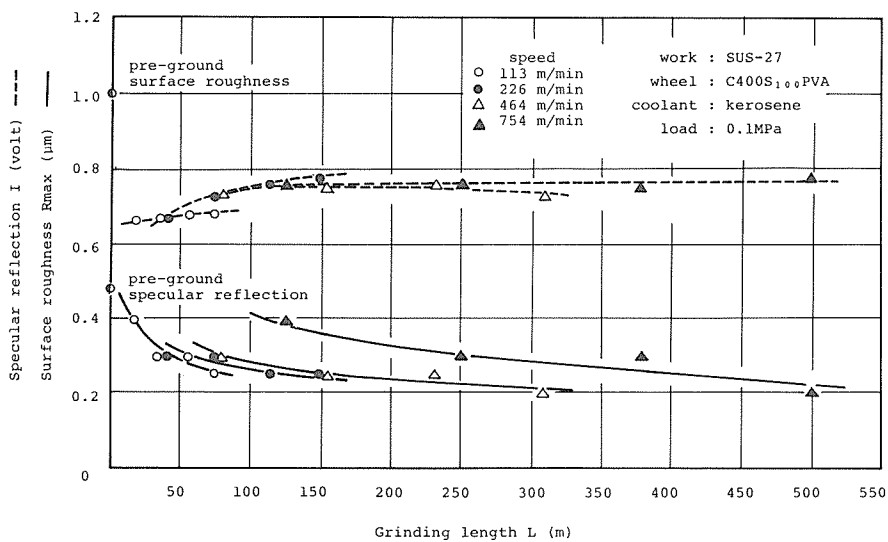
図6は研削速度をパラメータにとって、研削長さ L と仕上面粗さ R_{max} および光沢 I の関係を(a) Al24Sと(d) SUS-27について示したものである。粗さに関して、いずれの被削材も研削長さが長くなるにしたがって改善され、 $V=754\text{m/min}$ の高速を除外すると、研削速度、研削時間が異なっても、研削長さが同じであると、仕上面粗さは同程度の値をとり、Al24Sで $L=150\text{m}$ 、SUS-27で $L=100\text{m}$ になるとほぼ改善され、 $0.3\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 以下の小さな粗さが得られる。

光沢に関しても、粗さの場合と同様な傾向を示し、研削長さが長くなるにしたがって光沢は改善されるがAl24Sの場合、低速のほうが高い光沢を示し、SUS-27では、高速になっても光沢は劣化せず高い値を示している。以上の結果から、被削材によって若干の違いはあるが、前加工

面粗さが $1 \sim 1.5 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ であるなら, $120 \sim 460 \text{ m/min}$ の研削速度を用いると, 150 m の研削長さで仕上面性状はほぼ改善され $0.3 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ 以下の鏡面を得ることができる。



(a) A124S



(b) SUS-27

Fig.6 Relations between grinding length and finished surface properties in different grinding speed

3.2 仕上面粗さと光沢

図7は4-6黄銅, SUS-27, Al24Sの各被削材について全ての組み合わせ実験（ただし砥石圧力は0.05MPa, 0.1MPaである）によって得られた仕上面粗さ $R_{\max}$ と光沢 I の関係を示したものである。同じ粗さでも、光沢に違いがみられるのは加工条件すなわち研削速度、研削時間、砥石圧力が異なると加工表面の物性値（反射率）に違いが生じるためと考えられる。

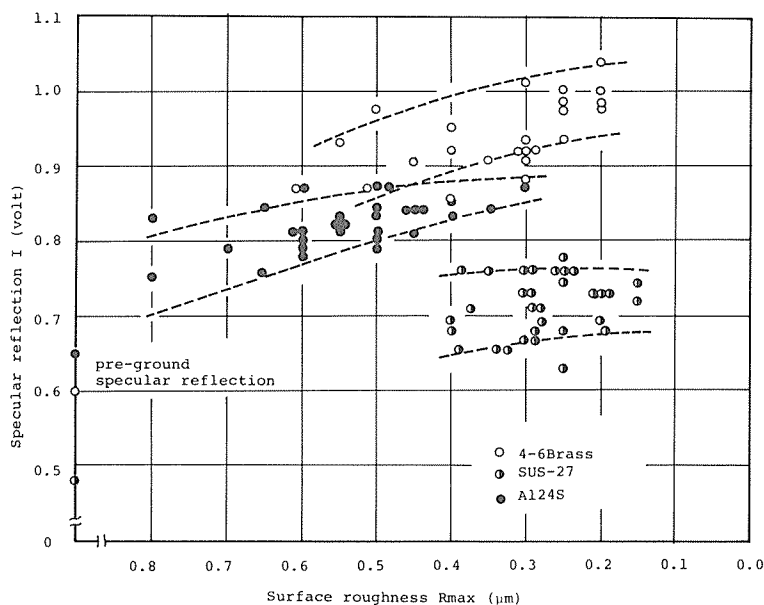


Fig.7 Relations between surface roughness and specular reflection in some different kinds of materials

軟質金属の場合、仕上面粗さが小さくなるにしたがって光沢は高くなり、粗さと光沢に比例関係がみられるが、SUS-27ではほぼ一定になっている。すなわち硬質金属になると前加工面に存在する深いキズを完全に除去できないため仕上面粗さは前加工面のキズの深さに影響をうけるが、仕上面の大部分はキズのない平滑な面になっており、照射面の平均強度である光沢はキズのない鏡面と同程度の高い値を示すものと考えられる。光沢の改善度（前加工面の光沢に対する $0.3\mu\text{m } R_{\max}$ における光沢の比）は4-6黄銅が1.65と最も高く、SUS-27の1.5, Al24Sの1.35の順になっている。この原因の一つとして、被削性の違いがあり、4-6黄銅は被削性が良いため、加工表面の変質層は小さく反射率が高くなっているものと考えられる。

次に実験によって得られた仕上面の鏡面の程度を判定するため、図8の(d)は1例としてS55Cの仕上面に市松模様を写し、その反射像を写真にとり、鮮明度光沢度をみたものである。また(a)は各々の仕上面反射像に対応する仕上面粗さ断面曲線である。前加工面には $1\mu\text{m } R_{\max}$ 程度の粗さが存在し市松模様の反射像はみられないが、研削速度 226 m/min で30sec研削すると $0.3\mu\text{m } R_{\max}$ の小さな粗さになり鮮明な市松模様がみられ、光沢のあるいわゆる鏡面に仕上がっていることがわかる。

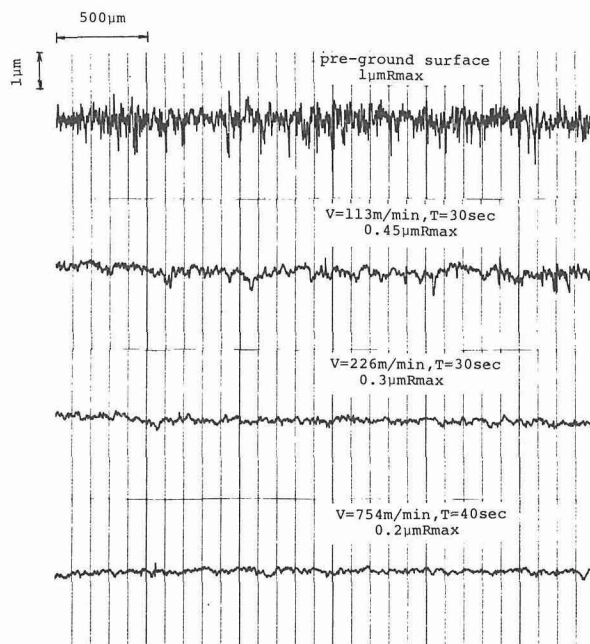
4. 検 討

4.1 PVA 砥石とビトリファイド砥石の研削機構

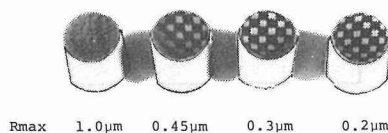
図9に示すようにSUS-27を例にとって、研削時間 T と仕上面粗さ R_{max} および光沢 I の関係を使用したPVA砥石と同じ粒度と砥粒率をもつVit.砥石を用いて実験し、研削機構の比較検討を行なった。なお加工条件は、WA砥粒を用いた他は、 $V=226\text{ m/min}$ 、 $P=0.1\text{ MPa}$ とPVA砥石の鏡面仕上加工条件と同じである。

仕上面粗さはPVA砥石の場合、研削時間が長くなるにしたがって改善され、20sec以上になるとほぼ一定になり、 $T=20\text{ sec}$ で $0.3\mu\text{m}R_{max}$ の小さな粗さが得られているが、Vit.砥石では時間の経過とともに逆に劣化する傾向にあり、 $T=20\text{ sec}$ で $3.6\mu\text{m}R_{max}$ と前加工面の粗さより大きくなっている。光沢はPVA砥石の場合、 $T=10\text{ sec}$ 以上になるとほぼ一定になり、 0.76 Volt の高い値を示しているが、Vit.砥石では 0.25 Volt となり、前加工面の光沢以下の値を示している。以上の実験結果から、SUS-27の鏡面仕上にはPVA砥石が適していること、そしてPVA砥石とVit.砥石の研削機構に大きな相異のあることがわかる。

Vit.砥石による超仕上の場合、一般に研削速度は低く数 m/min ～数 10 m/min であり、研削時間は長く数分である。低速



(a) Surface roughness profiles



(b) Reflection images on the finished surfaces

Fig.8 Surface roughness profiles and reflection images of hard metal (S55C)

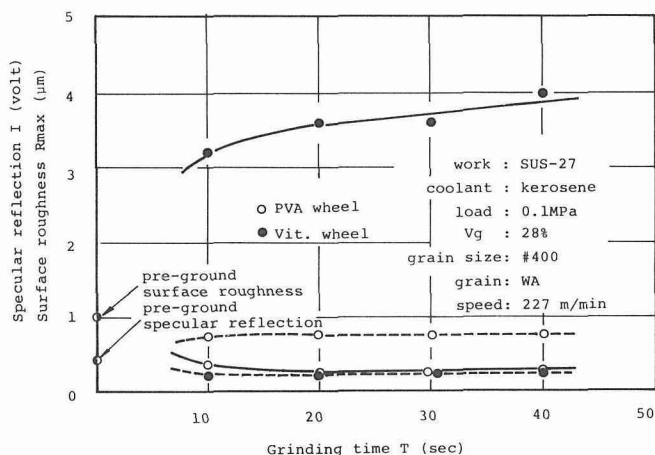


Fig.9 Differences of finished surface properties between PVA sponge wheel and Vit. grinding wheel

にすることは、仕上面に悪影響を与えるような砥石の振動や、大きな研削抵抗、研削熱の発生を防ぐためと考えられる。そして超仕上の研削機構は適当な研削のもとで、長時間研削することによって、砥石表面の目づまり、目つぶれを促進させ、この目つぶれ砥粒と被削材表面の摩擦によって表面の微小突起を機械的または溶融的に平らにして鏡面が得られるものと考えられている¹⁻²⁾。

しかし PVA 砥石の場合、大きな独立気孔をもつ砥石構造のため、切りくずは気孔内部へ逃げ、切刃表面への溶着や構成刃先は生じにくいこと、また通気性も良いため冷却効果が大きいことが考えられる。さらに弾性変形が大きいため、砥粒切込み深さは平均化され、被削材表面に深いキズをつけず、切残しのない均一な切削が行なわれること、粘性も大きいため、砥石の振動を吸収することが考えられる。このような理由から、PVA 砥石は軟質金属や難削材の鏡面仕上に適しているものと考えられる。

4.2 仕上面粗さと研削長さ

いずれの被削材の場合も、研削速度が 120 m/min~460 m/min 程度なら、仕上面粗さは研削長さの増加とともに指数関数的に改善されることが 3.1 節から分った。そこで仕上面粗さ $R_{\max}$ と研削長さ L の関係式を次式のように仮定し、PVA 砥石の各被削材に対する研削特性を検討した。

$$R_{\max} = (R_0 - R_e)(L + 1)^{-a} + R_e \quad (1)$$

ここで R_0 は前加工面の粗さ、 R_e は $L = \infty$ のとき得られる最終仕上面粗さ、 a は仕上面の改善の容易さを表す指数で被削材によって決まると考えられ、改善指数と呼ぶことにする。図10は(1)式を用い、図6の実験値から最小二乗法によって求められた $R_{\max}$ - L 曲線である。いずれの被削材の場合も、 $\pm 0.5 \mu\text{m} R_{\max}$ の範囲内で実験値とよく一致していることから、(1)式は $R_{\max}$ と L の関係を表わす回帰関数として、実用上十分であると考えられる。

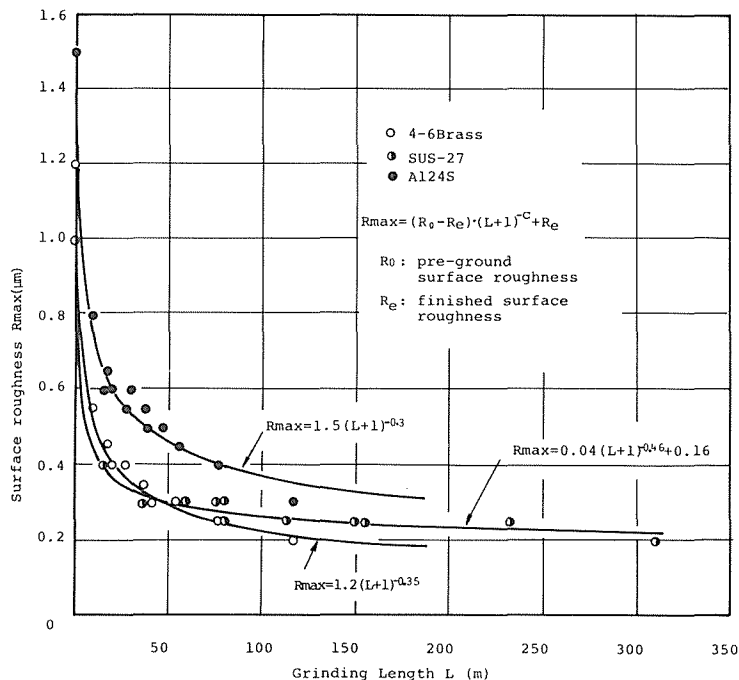


Fig.10 Estimation of $R_{\max}$ - L curves by using least squares method

次に各被削材に対する研削特性を検討する。最終仕上面粗さ R_e は軟質金属の場合（マイクロビッカースかたさ $H_v \approx 140$ ）、 $0.0 \mu m R_{max}$ となり、SUS-27 の場合（ $H_v \approx 360$ ）、 $0.16 \mu m R_{max}$ となることから、硬質金属になると長時間研削しても改善される仕上面粗さに限界がある。一方、改善指数 a も被削材によって異なり、SUS-27 の場合 0.46 と軟質金属（Al24S で $a=0.3$ 、4-6 黄銅で $a=0.35$ ）に比べて大きな値を示している。すなわち硬質金属にもかかわらず短かい研削長さで仕上面粗さは改善されている。また同じ軟質金属でも 4-6 黄銅のほうが Al24S に比べ容易に粗さは改善されることが分かる。ここで前加工面の粗さは SUS-27（ $1 \mu m R_{max}$ ）、4-6 黄銅（ $1.2 \mu m R_{max}$ ）、Al24S（ $1.5 \mu m R_{max}$ ）の順に大きくなっていることから、改善指数 a は前加工面の粗さに逆比例しており、粗さが小さいほど容易に改善される。

以上のことから、PVA 砥石における R_{max} と L の関係は近似的に(1)式によって表わされる。そして改善可能な仕上面粗さは被削材のかたさ H_v に影響を受け、また改善の容易さは前加工面の粗さと密接に関係していることがわかる。

5. 結 論

PVA 弾性砥石によって軟質金属であるアルミニウム合金（Al24S）、4-6 黄銅、および比較的に硬い高炭素鋼（S55C）、さらに難削材であるステンレス鋼（SUS-27）を超仕上の原理に基づいて、鏡面研削実験を行ない、仕上面性状（粗さと光沢）と加工条件の関係を求め、次のような結論が得られた。

- (1) いずれの被削材の場合も、WA 砥粒より C 砥粒のほうが仕上面性状の改善に適し、とくに軟質金属に対して、その改善度は大きい。
- (2) いずれの被削材の場合も、 1 kg/cm^2 程度の砥石圧力が仕上面性状の改善に適している。
- (3) 研削速度の増加とともに、仕上面性状は改善され、最も適当と考えられる研削速度は軟質金属の場合、 450 m/min 、硬質金属では低速な 250 m/min である。
- (4) $120 \text{ m/min} \sim 460 \text{ m/min}$ の研削速度を用いるなら、研削速度、時間が異なっても、研削長さが同じであると仕上面粗さは同程度になり、約 150 m になるといずれの被削材の仕上面性状もほぼ改善され、 $0.3 \mu m R_{max}$ 以下の良好な粗さを得ることができる。
- (5) 最終仕上面粗さは被削材のかたさ H_v に影響を受け、改善の容易さは前加工面の粗さに関係している。すなわち、 H_v 、前加工面さが小さいほど良好な仕上面を容易に得ることができる。

参 考 文 献

- 1) 曾田範宗監訳：固体の摩擦と潤滑，養賢堂（1961）。
- 2) 松井正己，中里昭三：超仕上作業とその原理，養賢堂（1965）。
- 3) たとえば
井上 睦：特殊といし PVA について，日本機械学会誌，57, 421 (1954) 131.
小原 正：PVA 砥石入門，機械と工具，9 (1962) 119.
- 4) たとえば
五十嵐悟，斎藤勝政：PVA 発泡体の内部構造と機械的性質，北大工学部研究報告，70 (1974) 26.
五十嵐悟，斎藤勝政：PVA 砥石の内部構造と機械的性質，北大工学部研究報告，75 (1975) 24.
- 5) 斎藤勝政，三好隆志：ファイバオプティクス光沢計の原理，精密機械，40, 2 (1974) 129.
- 6) 三好隆志，斎藤勝政：ファイバオプティクス光沢計の特性，精密機械，40, 3 (1974) 227.