

水溶性加工液による耐熱合金の超仕上げ*

上田隆司** 萩野健太郎*** 山田啓司** 細川 晃** 佐藤昌彦†

Effect of Water-solution Type Coolant in Superfinishing of Superalloy

Takashi UEDA, Kentaro OGINO, Keiji YAMADA, Akira HOSOKAWA and Masahiko SATO

The water-solution type coolant is used instead of ordinary oil type coolant and the effect of the coolant on the finishing is investigated experimentally. As work materials, titanium, titanium alloys and Ni-based alloy are used. Electrolytic in-process dressing is employed to promote the ability of metal removal because the water-solution type coolant is inferior to that of oil type one in the permeability. The specific cutting energy k_s of these materials are compared with k_s of a bearing steel in order to evaluate the machinability of the work materials. The results obtained are as follows. The superfinishing operation using a water-solution type coolant is the effective method to finish the surface of these difficult-to-cut materials when the electrolytic in-process dressing is applied together. The suitable conditions in electrolytic dressing for each work material are obtained, and the titanium which has the highest adhesive property needs the strongest electrolysis among the work materials used in this study. The electrolytic-in-process dressing makes it possible to maintain the cutting ability of the finer grain size stone for a long time, and to obtain the mirror surface of Incoloy 800 with #8000 SD diamond stone.

Key words : superfinishing, water-solution type coolant, electrolytic-in-process dressing, , superalloy, Ni-based alloy, titanium, titanium alloy, specific cutting energy

1. 緒 言

純チタンやチタン合金、ニッケル合金などの耐熱合金は比強度、耐熱性、耐食性に優れ、近年航空機や自動車部品を始め、幅広い用途に使われている。しかし、これらの耐熱合金は材質が凝着性に富むため、加工がむずかしく難削材の一つに分類され、良好な仕上げ面を効率的に得ることは難しい¹⁾²⁾。特に、鏡面を得ようとするとき、パフ研磨やラッピングのような遊離砥粒を用いる方法が一般的であるが、生産能率が極めて悪く量産には向かない。生産性や加工能率を上げるためには固定砥粒すなわち砥石を用いた加工法が極めて有利であり、その優れた加工性能から超仕上げが見直されてきている。ところが、#1000を越える微粒砥石を用いて能率良く鏡面を得ようとするとき、加工材料の凝着性が砥石目づまりを促進するため、従来の加工法に工夫を施す必要がある。

超仕上げではその加工機構から切り屑排除がむずかしく、一般に浸透性に富む油性加工液を使用して切り屑の排出を促進し、砥石目づまりを抑制している。ところが、生産現場において水溶性加工液を用いる加工と同一ラインを組むことが多く、超仕上げ加工前に水溶性加工液を乾燥したり、加工後に油の洗浄や脱脂を行う工程を必要とするなど、製品の流れを悪くしている。また、その廃油を処理する際にも環境問題がつかまとうなど、改善が望まれている³⁾。

そこで本研究では、純チタン、チタン合金、インコイなどの難削耐熱合金を水溶性加工液を用いた超仕上げによって効率よく鏡面加工する方法について検討している。水溶性加工液は浸透性に劣るため切り屑の排除能力が低下し、砥石目づまりが促進されて凝着をおこす恐れがある。このため、電解ドレッシング

を併用してこれらを防ぐ方法を検討している。このとき、電解ドレッシングによる切れ刃の自生作用促進にも期待がもてる。

2. 実験方法

2.1 実験装置および実験条件

図1に本実験において使用した電解超仕上げ装置の概観を示す。実験は#1000～#8000の円盤状ダイヤモンド砥石を用い、加振した角柱状の加工物を回転する砥石に一定圧力で押し付け、平面超仕上げを行った。実験条件は表1に示すように、加工速度 $V=34\text{m/min}$ 、振動数 907CPM とした。

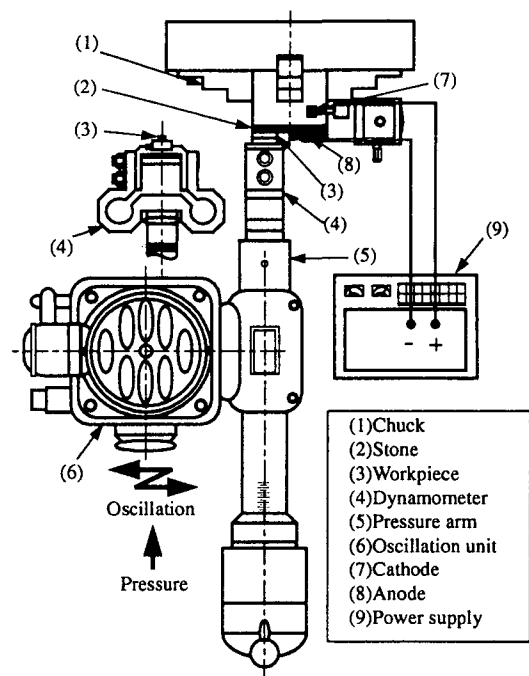


Fig.1 Main part of finishing machine

* 原稿受付 平成13年7月19日

** 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 学生会員 金沢大学大学院 (現、豊田鉄工(株); 豊田市 細谷町 4-50)

† 正会員 富山県立大学 (富山県小杉町黒河)

Table 1 Experimental conditions

| | | |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Finishing conditions | Finishing speed | 34m/min |
| | Frequency | 907cpm |
| | Amplitude | 1.6mm |
| | Coolant | Solution-type, Oil-type |
| Electrolytic conditions | Coolant | Solution-type |
| | Coolant temperature | 298K(25°C) |
| | Electrode gap | 1.0mm |
| | Voltage | 90V |
| Stone | Grain type | SD diamond |
| | Grain size | #1000 ~ #8000 |
| | Bond | Metal(bronze) |
| | Concentration | 100 |
| Workpiece | Titanium(Hv207), Ti-6Al-4V(Hv385) Incoloy800(Hv249), Incoloy825(Hv273) Hastelloy C276(Hv302), SUJ2(Hv751) | |

Table 2 Main chemical composition of work materials (%)

| | Cr | Ni | Mo | W | Fe |
|----------------|------|------|------|-----|-----|
| Incoloy 800 | 20.0 | 30.7 | 0.05 | - | >40 |
| Incoloy 825 | 21.5 | 42.0 | 3.1 | - | >22 |
| Hastelloy C276 | 14.7 | 57 | 15.6 | 4.8 | 4.8 |

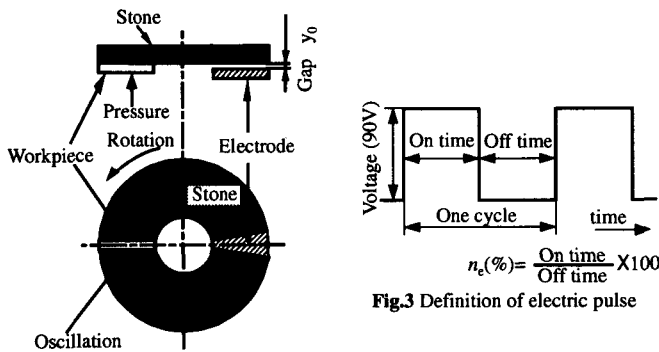


Fig.2 Illustration of electric dressing device

Table 3 Characteristics of coolants

| Coolant type | Solution-type | Oil-type |
|-----------------------|---------------|----------|
| Alkanolamine mass % | 30 | --- |
| Mineral oil mass % | --- | 85 |
| Rust inhibitor mass % | 30 | --- |
| Water mass % | 38.7 | --- |
| Others mass % | 1.3 | 15 |
| Sulfur mass % | --- | 0.7 |
| Chlorine mass % | --- | 1.2 |
| Fatty oil mass % | --- | 12 |
| pH(×30) | 9.8 | --- |

図2に電解ドレッシング部の模式図を、表1に電解条件を示す。砥石を陽極、銅板を陰極とし電極ギャップを1mmと一定に保っている。両極間には加工液を介して電圧を加え、砥石(陽極) - 銅板(陰極)間の電解作用によるドレッシング効果を得ている。電解電源には90V 直流パルス電源を使用し、図3に示す直流パルスのオンタイム比率 n_e を変化させ電解強度を調節している。パルス幅は、不導体物質の生成や砥石の形くずれを抑制して安定した加工状態を得るために、 $1\mu s$ を基準にして設定している³⁾。 n_e を50%以下に設定する場合、オンタイム $=1\mu s$ としてオフタイムを変化させ、50%以上に設定する

とき、オフタイム $=1\mu s$ としてオンタイムを変化させることで電気を調節した。また、特に強い電解を必要とする場合には、陽極の銅板面積を従来の5倍の大きさに変更することによって、電解強度を大きくしている。

2.2 実験材料

実験に使用した加工物の特性値を表1に示す。表に示すように、純チタン、チタン合金(Ti-6Al-4V)、ニッケル合金(インコロイ800、インコロイ825、ハステロイC276)及び比較のため高炭素軸受鋼(SUJ2)を用いた。ニッケル合金の化学成分を表2に示す。形状は $20 \times 3 \times 3\text{ mm}$ の角柱状であり、加工前に#1000の砥石で所定の前加工を施して用いている。

表1に実験で使用した砥石の仕様を示す。砥石はいずれもダイヤモンド砥石で、ボンドには不導体被膜を生成しにくいブロンズ系メタルボンドを使用している。表中の曲げ強度はボンドの砥粒保持力の大小の目安となり、強度の大きい物ほど保持力が大きいことを表す。砥石粒度は#1000、#2000、#4000、#8000の4種類としているが、この他#16000の極微小粒度の砥石も準備したが、今回の研究では十分な加工を行うことができなかった。形状は図2に示すように外径 $d_o=60\text{ mm}$ 、内径 $d_i=20\text{ mm}$ の円盤状である。砥石は#320のGC砥石でドレッシングすることにより、加工前の砥石作業面の状態を一定にしている。

加工液として用いた水溶性加工液(日本グリース、サンクルGF-200)、および比較のために用いた油性加工液を表3に示す。水溶性加工液は脂肪酸など油性向上剤を含んでいないソリュションタイプの研削液である。油性加工液は精製鉱物油をベースにイオウ、塩素、油脂を添加して用いている。

2.3 評価方法

超仕上げにおける加工特性の評価には、砥石平均切り込み深さ \bar{d} 、比加工エネルギー k_s を用いる。 \bar{d} および k_s は角柱状の加工物の厚さ減少速度 $d(\delta H_w)/dt$ と加工抵抗接線方向分力 F_t を用いることにより次式で与えられる⁴⁾⁵⁾。

$$\bar{d} = \frac{2\pi L_w B_w (d_o + d_i)}{V_s \left\{ (d_o^2 - d_i^2)\pi - 4d_i a \right\}} \cdot \frac{d\delta H_w}{dt} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{2F_t V_s}{\pi L_w B_w} \left(1 + K^2 \right)^{\frac{1}{2}} E(k) \frac{1}{d(\delta H_w)} \quad (2)$$

ここで、 L_w :加工物の長さ、 B_w :加工物の幅、 δH_w :加工物の高さ減少量、 V_s :砥石回転周速度、 d_o :砥石外径、 d_i :砥石内径、 a :加工物の振幅、 τ :加工時間、 $K^2=k^2/(1+k^2)$ 、 $k=a\omega/V_s$ 、 ω :角振動数、 $E(k)$:第2種楕円積分 $\div 2\pi$ である。

加工実験を行い、実験的に仕上げ量(切削量)および切削抵抗を測定することによってこれらの値を具体的に求めることが出来る。 \bar{d} が大きく、 k_s が小さいほど、砥石の評価では切削性が良く、加工材料の評価では被削性が良く、電解条件を含めた加工条件の評価では優れた条件と判断することができる。また、この様に評価関数 \bar{d} 、 k_s には全ての加工条件が含まれていることから、異なる加工条件で行った実験結果を同一レベルで評価することが可能となるなどの特長もある。

3. 実験結果

3.1 砥石圧力が切削性に及ぼす影響

一例として、図4に純チタンを水溶性加工液を用いて#1000砥石で超仕上げ加工したときの切削特性を示す。砥石圧力 P_d

を変化させたときの比切削エネルギー k_s および砥石平均切り込み深さ \bar{d} を調べている。電解を加えていない $n_e=0\%$ の場合、 P_n を大きくするに従って k_s が大きくなっており、砥石が切れ味を失って目つぶれ状態に移行していくことがわかる。このため、 \bar{d} も小さな値で横ばいになっている。これに対し、 $n_e=33.3\%$ と電解を加えた場合、 P_n が大きくなって k_s は小さな値でほぼ横ばいとなっており、砥石が正常な加工状態を維持していることがわかる。このため、 P_n を上げて加工条件を過酷にすると、 \bar{d} が順調に大きくなる傾向を示している。

この結果より、本研究に用いている加工材料を水溶性加工液単独で超仕上げ加工することは難しく、電解ドレッシングを適用することが砥石の切れ味を持続する上で有効な手段であるといえる。

3.2 最適電解強度

各材料でその切削特性が異なることから、最適となる電解条件にも差があると考えられる。そこで、電解強度が切削特性に及ぼす影響を調べてみた。図5に砥石圧力 $P_n=0.82\text{MPa}$ の条件下で、 n_e を変化させた場合の加工特性を調べた結果を示す。用いた加工物はTi-6Al-4V、砥石はSD1000である。

図に見るように、オンタイム比率の増加とともに \bar{d} が大きくなり、 k_s が小さくなっていき、砥石の切削性が向上している。 $n_e=60\%$ で \bar{d} が最も大きく、 k_s が最も小さくなっており、このときのオンタイム比率が最適な電解強度であると判断することができる。同様の実験を各加工物に対して行い、最適と判断されるオンタイム比率をまとめたものが表4である。純チタンで $n_e=80\%$ と最も大きく、続いてTi-6Al-4Vで $n_e=60\%$ 、インコロイ800などニッケル合金で33.3~50%、SUJ2で33.3%となっている。チタン合金はニッケル合金に比べて砥石の目つぶれが激しいため、強い電解ドレッシングが必要となると考えられる。

3.3 加工時間経過に伴う切削性能の変化

図6に加工時間 τ の経過に伴う仕上げ特性の変化を示す。加工物はTi-6Al-4Vであり、3つの加工状態を比較している。(1)●水溶性加工液を用いて電解をかけない非電解の場合、(2)○水溶性加工液を用いて電解をかけた場合、(3)□油性加工液を用いた場合*である。総加工量 ΣD 、1分当たりの加工量 ΔD 、比加工エネルギー k_s 、仕上げ面粗さ Ra の変化を調べている。

図より、 ΣD において、電解超仕上げでは非電解の2倍以上の値が得られている。また、加工時間が経過しても単位時間当たりの加工量 ΔD が減少する傾向は見られず、 k_s も油性と同程度の低い値でほぼ一定で推移していることから、長時間の加工でも安定した加工が持続していることがわかる。仕上げ面粗さ Ra も小さな値で一定している。これに対し、非電解超仕上げでは k_s や Ra のバラツキが大きく、加工が安定していない。切り屑の排除がむずかしく、砥石の切れ味が大きく失われているといえる。一方、油性加工液を用いた場合、大きな加工量が得られている。しかし、 k_s や Ra に関しては電解超仕上げとほぼ同程度で

Table 4 Optimum value of n_e

| Work material | n_e | % |
|---------------|-----------|---|
| Titanium | 80 | |
| Ti-6Al-4V | 60 | |
| Ni alloy | 33.3 ~ 50 | |
| SUJ2 | 33.3 | |

*油性加工液では非電解加工である。

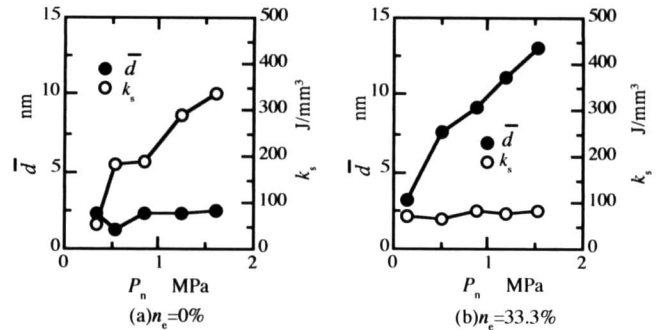


Fig.4 Influence of stone pressure on finishing performance (SD1000, Titanium)

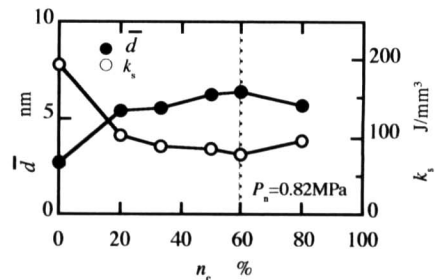


Fig.5 Influence of percentage of on time in pulse on cutting ability (SD1000, Ti-6Al-4V)

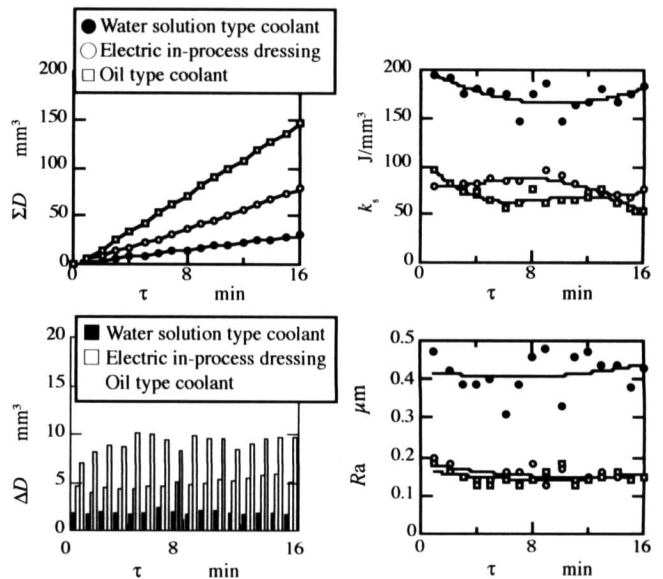
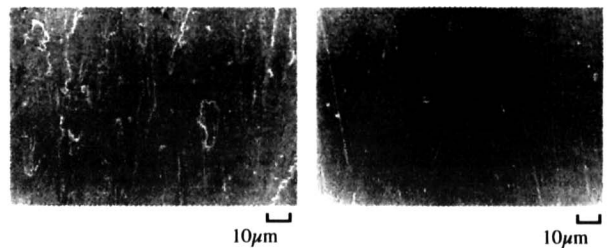


Fig.6 Influence of electrolytic in-process dressing on finishing performance (SD1000, Ti-6Al-4V, $P_n=0.82\text{MPa}$)



(a) Finished with water solution type coolant
(b) Finished with electrolytic in-process dressing
Fig.7 SEM photographs of superfinished surface (SD1000, Ti-6Al-4V, $P_n=0.82\text{MPa}$)

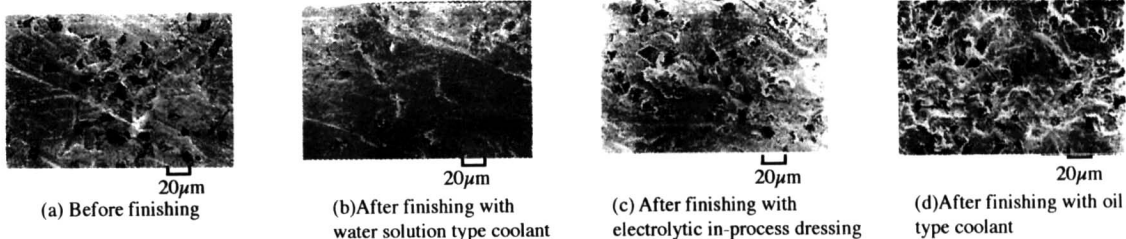


Fig.8 SEM photographs of stone surface (SD1000, Ti-6Al-4V, $P_n=0.82\text{MPa}$)

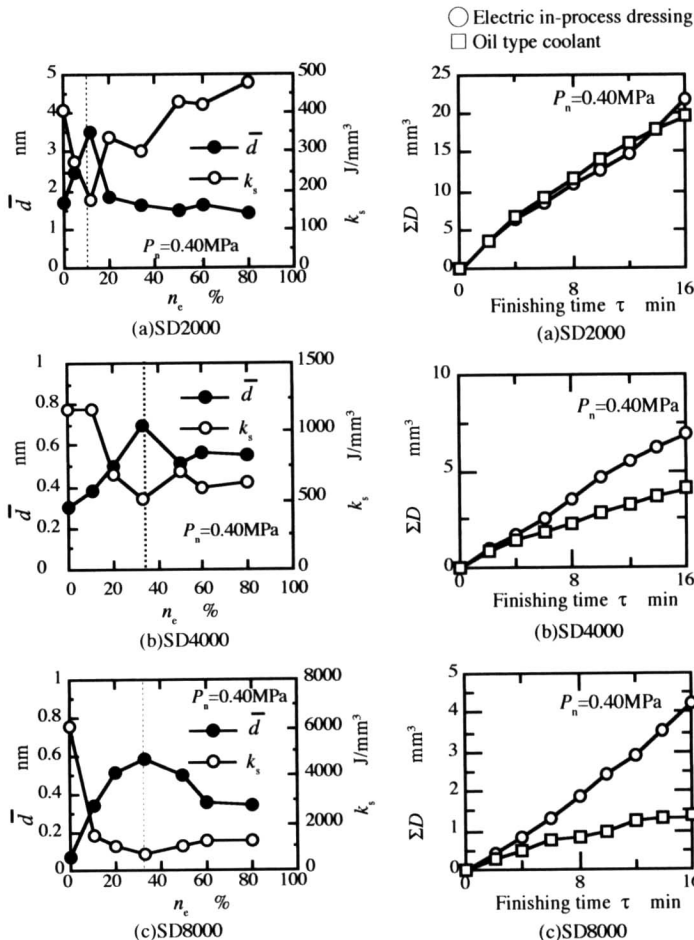


Fig.9 Influence of grain size on cutting ability of stone (5 time larger electrode is used, Incoloy800)

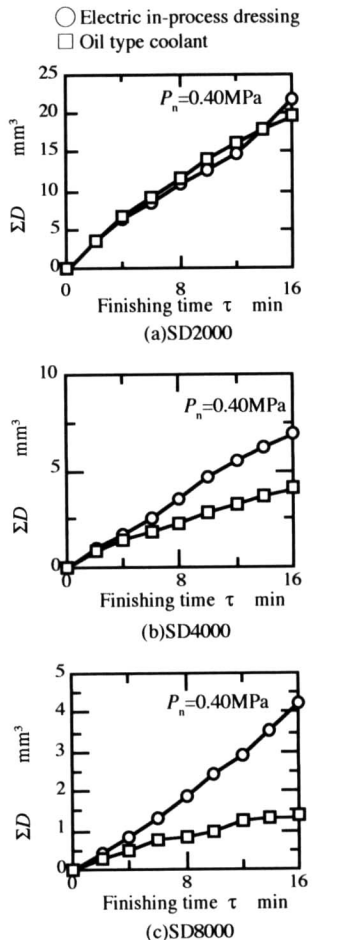


Fig.10 Influence of grain size on metal removal (5 time larger electrode is used, Incoloy800)

ある。したがって、水溶性加工液でも電解ドレッシングを適用することにより、油性加工液に匹敵する切削性能を得ることが出来るといえる。

図7に加工後の仕上面写真を示す。図より非電解超仕上げでは仕上面にむしれが多数存在していることがわかる。水溶性加工液では浸透性が劣るため切りくずの排出がむずかしく、砥石作業面に堆積した切りくずが仕上面と凝着を起こすためである。一方、電解超仕上げでは、仕上面にむしれはなく、砥粒の加工条痕のみが観察されており、電解ドレッシングにより切りくずの排出が油性加工液のようにスムーズに行われていると考えることができる。

図8に加工後の砥石表面写真を示す。図にみるように、(a)加工前の砥石表面には黒い点で表されるダイヤモンド砥粒が多数観察されるが、(b)非電解超仕上げではほとんど砥粒が確認できない。このことから、砥石が目つぶれ状態となり切削性が大きく損なわれていることがわかる。一方、(c)電解超仕上げでは加工後においても砥粒が多数観察されることから、電解によるド

レッシングの効果が確認できる。(d)油性加工液の使用においても砥粒が多数確認できる。

3.4 砥石粒度の最適電解強度への影響

砥石粒度が細くなると、砥石の切れ味が低下するため排除すべき切り屑の量は少なくなるが、砥石作業面と加工表面の隙間は小さくなり、切り屑の排除が難しくなる。また、砥粒保持力が小さくなるため、電解を強くし過ぎると砥粒の脱落を招く恐れがあり、電解条件の選定が難しいと考えられる。そこで、最適な電解強度に及ぼす砥石粒度の影響を調べてみた。

図9に異なる粒度の砥石を用いて、砥石平均切り込み深さ \bar{d} 、比加工エネルギー k_s に及ぼすオンタイム比率の影響を調べた結果を示す。加工物にはインコロイ800を用いた。また砥石粒度が細かいことからより激しい目づまりが予想されるため5倍の面積をもつ電極を陰極に用いた。図より#2000砥石では $n_e=11.1\%$ 、#4000砥石で $n_e=33.3\%$ 、#8000砥石では $n_e=35\sim 40\%$ において \bar{d} が大きく k_s が小さくなっている。従って、砥石粒度が細かい砥石ほど強い電解ドレッシングによって切り屑の排除を促す必要のあることがわかる。

図9から求められた最適電解条件下で長時間の加工を行い、油性加工液による超仕上げと加工量を比較した。その結果を図10に示す。加工材料には同様にインコロイ800を用いている。#2000砥石では両者の間に大きな差はなく、ほぼ同程度の加工量が得られている。しかし、#4000砥石になると、電解超仕上げでは油性加工に比べて1.5倍程度の加工量が得られている。電解ドレッシングによって砥石の切れ味が保持されているといえる。この傾向は#8000砥石になるとさらに強く、加工量は油性の4倍近くも大きくなっている。また、油性加工液では時間経過とともに加工量が飽和する傾向を示しており、次第に砥石が目づまりする傾向にあると考えられる。すなわち、砥石粒度が微細になるほど電解ドレッシングの効果が大きくなることになる。

図11にそれぞれの砥石の加工で得られた仕上面の粗さプロフィールを示す。加工時間は1分である。砥石粒度が細くなるにしたがって、仕上面性状が向上しており、#2000砥石で $Ra=0.036\mu\text{m}$ 、#4000砥石で $Ra=0.028\mu\text{m}$ となり、#8000砥石では $Ra=0.02\mu\text{m}$ が得られている。図12に#8000砥石で仕上げたときの加工面を示すが、鏡面が得られていることがわかる。

3.5 被削性の比較

k_s - \bar{d} 線図によって各種加工物の被削性を比較した結

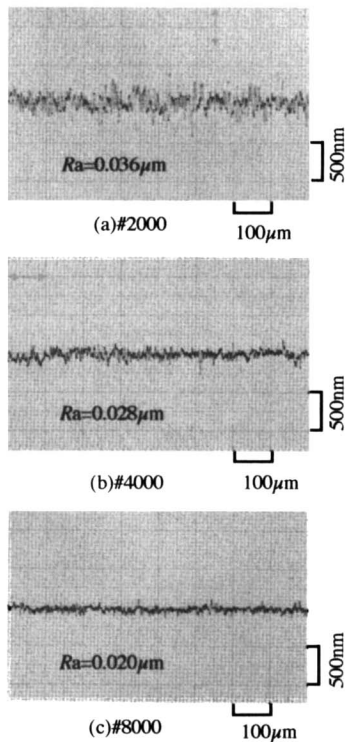


Fig.11 Profiles of surface roughness of Incoloy800 finished with electrolytic in-process dressing



Fig.12 Work surface of Incoloy 800 finished by #8000 stone with electrolytic in-process dressing

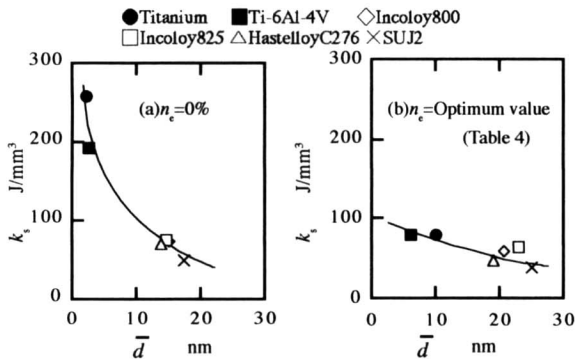


Fig.13 k_s - \bar{d} diagram (SD1000, $P_n=0.82\text{MPa}$)

果を図13に示す。電解なし ($n_e = 0\%$) と、 n_e を表4に示す最適オンタイム比率で加工した場合を比較している。図に置いて、左上に位置する材料ほど被削性が悪く、右下に位置する材料ほど被削性が良いと判断できる。すなわち、少ないエネルギーで多くを加工できることになる。図より、純チタンとTi-6Al-4Vが他の材料に比べてはるか左上に位置しており、極めて被削性に劣ることがわかる。SUJ2が右下に位置しており、これらの材料の中では最も被削性が良いといえる。しかし、炭素鋼の中ではSUJ2は硬度も高く、被削性の悪い材料に分類されている⁴⁾。したがって、本研究で取り上げた加工材料の被削性が極めて悪いことがわかる。また、ここで用いた3種類のニッケル合金の被削性はほぼ同程度であるといえる。

電解ドレッシングを施すと、砥石の切削性が向上し、材料の被削性が大きく改善されている。特に、チタン系の金属の改善が著しく、電解ドレッシングが超仕上げに有効であることがわかる。SUJ2やニッケル系金属においても改善されているが、チタン系材料ほどではない。

4. 結 言

チタン系、ニッケル系の耐熱合金を水溶性加工液を用いて効率よく超仕上げ加工する方法について検討してきた。得られた主な結果をまとめると次のようになる。

- 1) 凝着性に富むこれらの金属の加工においても、電解ドレッシングを併用することで水溶性加工液を用いて効率よく超仕上げ加工を行うことができる。
- 2) チタン系金属は特に凝着しやすく、強い電解条件下で加工する必要がある。
- 3) 各材料には最適な電解条件があり、この条件下では砥石の切削性を長時間維持することが出来る。
- 4) 粒度の細かい砥石では目づまりが激しくなるため、より強い電解ドレッシングが必要であるが、粒度が細くなるほど電解の効果が大きく現れ、インコロイ800では油性加工液をはるかに上まわる切削性を長時間維持することが出来る。
- 5) 砥石粒度を #1000 から #8000 まで順次上げていくと、仕上げ面粗さは着実に改善され、鏡面を得ることが出来る。

参 考 文 献

- 1) 北嶋弘一：チタン・チタン合金の鏡面研磨，機械と工具，4(2000)62.
- 2) 石川忠幸, K.V.Kumar: 超砥粒ホイールによるNi基耐熱合金の高効率研削，精密工学会誌，58,4(1992)597.
- 3) 上田隆司, 坂本 智, 杉田忠彰：水溶性加工液による超仕上げ：精密工学会誌，62,2(1996)252.
- 4) 上田隆司, 金曾久佳, 杉田忠彰：超仕上げの加工機構に関する研究，日本機械学会論文集C編，57,538(1991)2154.
- 5) 上田隆司, 大野誉洋, 坂本 智：ファインセラミックスの超仕上げ加工：精密工学会誌，62,8(1996)1014.