

ジルコニアキャピラリの内径研削用テーパワイヤ工具の開発

上村康幸*1, 土屋健介*1, 谷 泰弘*2

*1 東京大学生産技術研究所, *2 立命館大学

1. 緒言

ジルコニアキャピラリ (FTTH 用) の内径研削は、鞘内で 20 個程度を一行に並べたキャピラリを半田で固定し、酸でテーパ状にエッチングした 20m 程度の長尺のワイヤにスラリーをかける遊離砥粒加工が用いられている。しかし、ワイヤのエッチングや加工には長時間を要するうえ、研磨後の洗浄工程に手間がかかるため、生産性の低下が指摘され、内径研削盤による全自動化が切望されている。これに対し、固定砥粒方式による内径研削が試みられているが、砥粒の喰い付きによるワイヤ工具の断線が問題となり、実用化に至っていなかった。

そこで、高速めっき法の一つであるブラシによる複合めっきを応用してなだらかなテーパ状のワイヤ工具を提案し、キャピラリの内径研削に適用できるか試みた。また、ジルコニアキャピラリの生産性向上のために、ワイヤ工具をキャピラリのコア部に自動通線できる全自動内径研削盤を試作した。この研削盤に振動を付与できる機構を組込み、提案したテーパワイヤと振動付与機構を併用して、これまで懸案となっていたワイヤ工具の断線防止策について検討した。その際、振動付与の条件、工具形状、加工条件を評価項目として、実用性の高いテーパワイヤ工具を開発することにした。

2. 内径研削装置

2.1 テーパワイヤ工具の必要性 キャピラリの内径 (ブランク径: $\phi 114\mu\text{m}$) を 1 パスの研削で規定精度 (表 1) に収めることのできるワイヤ工具を開発する。この工具に求められる課題として、研削時の負荷を軽減し工具寿命を延ばすこと、断線を防止できるようにすることである。そのためには、砥粒をテーパ状に固定できるテーパワイヤ工具の開発が必須である。テーパ状にすれば研削時の工具負荷を小さくできるため、工具摩耗を減少できる。摩耗を少なくできれば、一本の工具で複数のキャピラリを連続研削でき、キャピラリの生産性を上げられる。そこで、試験的にテーパ状のダイヤモンドワイヤ工具を製造し、内径研削を試みた。その際、キャピラリは高速回転させた。回転を与えた理由は、内径研削後の真円度・同芯度・面粗さを規定の精度内に収めるためである。これは、①複合めっきした工具の砥粒層は夫々偏りをもっており、この影響を取り除くことと、②キャピラリを固定した主軸 (回転精度: $5\mu\text{m}$ 以下) の中心とワイヤ工具の取り付け位置とのずれの影響を取り除くためである。実験の結果、キャピラリの回転だけでは工具が断線し、加工できないことが分かった。

2.2 振動付与の必要性 テーパワイヤ工具の断線は、脱粒砥粒や切屑がキャピラリに喰い付くことによる工具の振れが原因であると考えた。そこで、過度の喰い付きを抑制し、工具にかかる負荷を断続的に回避させる目的で、キャピラリに送り方向と同じ方向に数十 Hz の振動を付与させることにした (図 1)。振動の付与によって、研削時の切屑や脱粒した砥粒の排出性向上の効果も期待できる。

2.3 内径研削装置の概要 ジルコニアキャピラリの生産性を上げるために、全自動内径研削盤を試作した。本機は、加工ステーションと計測ステーションより構成されており、ブランクキャピラリの整列供給から自動研削後のキャピラリ内径の計測および工具の排出まで全自動で行うことができる。そのフローチャートを図 2 に示す。内径研削は 1 ロット 20 個を整列させた内の 1 個を加工ステーションの主軸に固定して行い、研削後のキャピラリを計測ステーションに移送して計測を完了するまでを一工程 (目標 40 秒以内) とした。この工程が全自動で 20 回繰り返される。この加工機に、振

Table 1 Demand processing accuracy

	Inside diameter	Circularity	Surface roughness
Target	125.0-126.2 μm	Within 1.0 μm	Within Ra 0.2 μm

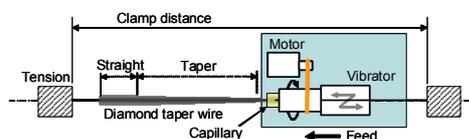


Fig.1 Internal grinding image of zirconia capillary

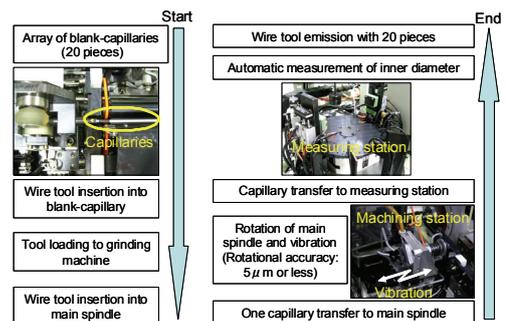


Fig.2 Flowchart for internal grinding machine

動を付与できる機構を組み込み（図1），試作したテーパワイヤ工具を固定した．研削時は高速回転しているキャピラリに送り方向と同じ向きに振動を与えた．振動の付与には電磁加振機を採用した．この加振機と主軸用モータを同一テーブル上に固定した状態で，キャピラリに振動と回転を同時に与えてテーブルを移動させた．

3. テーパーワイヤ工具の断線防止と加工負荷の軽減化

3.1 振動振幅の条件 テーパーワイヤ工具の作製には砥粒を懸濁させたスルファミン酸の複合めっき浴を，電着用のワイヤ（芯線の直径は $\phi 84\mu\text{m}$ ）には，芯線とニッケルとの密着性の高いプラスめっき（膜厚 $0.3\mu\text{m}$ ）が施されているものを使用した．砥粒層をテーパ状にするために，ワイヤの線速度を一定に保ちながら電流値をスロープ状に変化させながら製造した．予備実験で工具磨耗が同一寸法の研削品の個数に影響していることが分かった．これを解決するためには，工具のストレート部の最後尾が減らないように長くすると良い．しかし，工具長は 300mm に限られているために，ストレート部を長くするとテーパ部が短くなり，断線し易くなる．断線を抑えるために送りを下げると生産性が悪くなる．そこで，最適な工具形状，すなわちストレート部とテーパ部の最適な比率を求めることにした．また，断線を防止するために振動の条件についても検討した．これにより，工具磨耗が抑制され，内径の安定したキャピラリを量産できるはずである．

図3に，研削の加工モデルを示す．ワイヤ工具に挿入したキャピラリは f の周期で振動（振幅 a ）しながら毎分 n 回転している．この状態を維持しキャピラリを v の速度で左方向に送りながら，徐々に内径を上げ，1パスで所定の寸法をクリアする．加工モデルに記載した工具のテーパ部は L_t ，ストレート部は L_s ，芯線の径は D_w ，複合めっき後の工具径を D_d とした．複合めっきの厚み E_w は $(D_d - D_w) / 2$ である．1回転当たりの工具の移動量 v_n は， $v_n = v/n$ であり，この間に移動したときの工具の切込み深さ t_g は，(1)式で表わすことができる．テーパ部の α は $\tan^{-1} E_w / L_t$ で表される．(1)式から， v を遅くし， n を高くすると研削時の工具切込み深さ t_g は小さくなり，工具に掛かる負荷を軽減できる．しかし，切屑や脱粒砥粒の排出性が悪いと，切屑が工具に喰い付き工具は振れ断線する．そのため，振動を付与した．加工モデルに示したように，切屑の排出性は，振動付与時の振幅の大きさに影響すると考える．そこで，まず振動振幅について検討することにした．評価は，研削個数と工具断線から判断した．振動を与える方向は， $n=9300\text{rpm}$ で回転しているキャピラリの送り方向（ $v=600\text{mm/min}$ ）と同一にした．ブランクキャピラリの内径は $114\mu\text{m}$ ，工具径は約 $136\mu\text{m}$ ，テーパ部の長さは 200mm ，クランプ間隔（研削時の工具長さ） 300mm ，ワイヤのテンションは 10N とした．

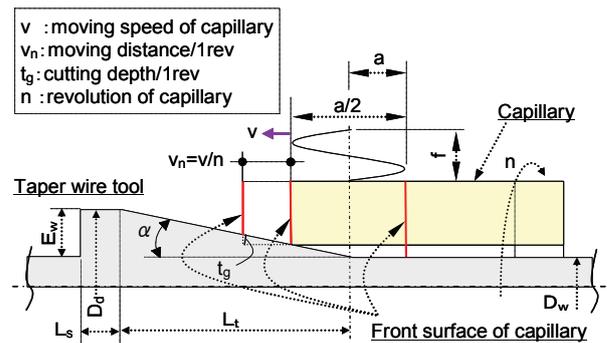


Fig.3 Internal grinding model

$$t_g = \sin \alpha \cdot v_n \dots \dots \dots (1)$$

Table 2 Evaluation of tools by frequency

Grinding conditions		Revolution $n=9300\text{rpm}$, Clamp= 300mm , Tool: Taper $L_t=200\text{mm}$, Without straight		
Frequency f Hz	Amplitude a mm	Number of good pieces	Feed v mm/min	
0	0	0 (Wire broken)	400	
38	3	50	600	
60	1	20	400	
120	0.35	6 (Wire broken)	400	

表2は振動振幅と工具が断線するまでの研削個数を示したものであり，振動を付与しなければ工具は断線することが分かる．この結果，切屑や脱粒砥粒の喰い付きによる断線を回避するためには，1回振動したときに確実にキャピラリが工具から離脱していることが重要である．モデルから，振動の負の方向の最大速度がキャピラリの送り速度より大きい場合，キャピラリは工具から離脱する．振動の最大速度は $f \cdot a \cdot 2\pi$ で表され，送り速度より十分に大きい値である．実験の結果，全ての条件で離脱できるはずだが， 120Hz ， 0.35mm は断線した．この原因として，工具が加工反力により弾性変形したと考えられる．実際に，テンションをかけると工具は伸びる．

そこで，クランプ間隔の長さとして工具の伸び量について検討した(表3)．工具形状は，テーパ部 60mm ，ストレート部 20mm にした．その他の条件は，表2と同じにした．その結果，クランプ間隔が短いほど研削個数は増え，逆に長くなると v を 200mm/min に下げても工具は断線し研削できない．これは，

Table 3 Evaluation of tools by clamp distance

Grinding conditions		Revolution $n=9300\text{rpm}$, Tool: Taper $L_t=60\text{mm}$, Straight $L_s=20\text{mm}$	
Clamp interval	Number of good pieces	Feed v mm/min	
800	0 (Wire broken)	200	
400	1 (Wire broken)	600	
300	30	600	

クランプ間隔が長くなれば、これに比例して伸び量も大きくなるため、振幅の効果が得られなかったと考える。これを検証するために、ワイヤ工具のテンションと伸び量の関係について引っ張り試験を行った(図4)。この結果は、クランプ間隔を500mmに固定し、非めっきワイヤとストレート工具の伸び量から、評価する3本のテーパ工具の伸び量を算出しプロットした結果である。基準にした芯線の直径は84 μm 、ワイヤ工具の直径は124 μm を使用した。研削加工時は工具剛性を上げるために10Nのテンションを与えている。この状態から加工がスタートする。クランプ間隔800mmの工具は、プラス10Nでさらに9mm程度伸びることになり、付与した3mmの振幅では喰い付きを回避できず断線することが分かった。一方、間隔300mmの工具では3mm弱伸びているが、3mmの振幅で十分回避できることが示された。クランプ間隔を決定する際は、伸び量を考慮し、それ以上の振幅が与えられていることが重要である。

この結果、表2で示した120Hzで断線した原因は、振幅が不十分であったと考える。一方、38Hz、3mmは、最大速度も十分、振幅も十分だったといえる。工具断線を回避するためには、振動の最大速度と加工反力による弾性変形量を考慮すればよい。

3.2 工具形状の検討 工具断線の防止策として、まず振動振幅とクランプ間隔を決定した。本節では、工具負荷の軽減策として寿命にも関係する工具形状について検討した。評価は研削個数から判断し、内径が目標寸法の125 μm を下回った時点で加工を中止した。工具径は約136 μm 、回転数9300rpm、送り速度400mm/min、振動振幅は38Hz、3mm、クランプ間隔300mm、ワイヤのテンションを10Nとした。表4に、工具形状について検討した結果を示す。1~2と3~6を比較するとテーパの長短は工具寿命に、ストレート部の長短は4と5の比較で目標寸法の安定性に影響していることが分かる。この結果から、テーパの長さは60~100mm、ストレート部の長さは50~60mmを最適とした。このときの研削個数は最大60個以上を可能にしている。また、図1に示した工具の取り付けから内径計測までの時間は一工程30秒以内を実現し、キャピラリ内径研削の要求を満たした。

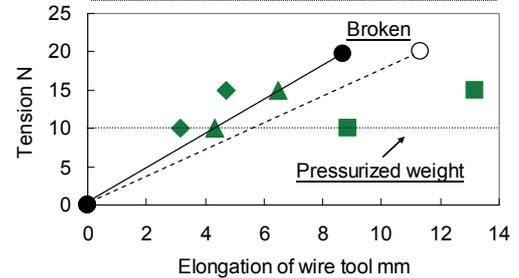
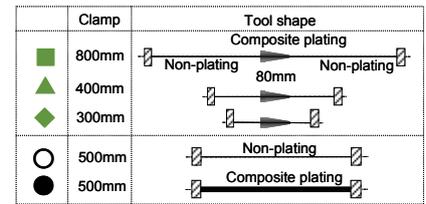


Fig.4 Tensile test of wire tool

Table 4 Evaluation of tool shape

Grinding conditions		Revolution n=9300rpm, Clamp=300mm, Feed v=400mm/min	
Taper L _t mm	Straight L _s mm	Number of good pieces	
1	40	30	2 (Wire broken)
2	40	80	3 (Wire broken)
3	50	20	10
4	60	20	30
5	60	60	50
6	100	50	60

4. キャピラリ内径の安定化

4.1 内径安定時の研削個数 前章で決定したテーパ工具の形状と加工条件を用い、研削後の内径が目標寸法に収まる最大研削個数について検討した。内径が目標寸法を超えるとブランク材の無駄使いとなり、逆に、小さいと再研削に回され時間の浪費となる。キャピラリの回転数は、加工モデルに示した切込み深さ t_g (作用砥粒数により変化するため定量化は省略)を小さくすることを目的に14200rpmにした。工具のテーパ部は60~100mm、ストレート部は50~60mmとした。これ以外の条件は、3.2節と同じである。

図5に3本の工具によるキャピラリ内径の連続加工結果を示す。使用前の工具の最大直径は、工具a=140 μm 、工具b=136 μm 、工具c=135 μm である。内径の変化は研削個数が増えるに従って小さくなっていることから、工具径は次第に安定していると思われる。内径が安定したときの最大研削個数は、工具aで25個(内径129-128 μm)、工具bで27個(内径127-126 μm)、工具cで25個(内径127-126 μm)であった。

しかし、規格表(表1)で個数を評価すると、bとcの工具で数十個程度であり、使用前の工具径が個数に大きく影響していることが分かる。そこで、規格表の寸法に達したときの工具径を測定してみると123 μm に減少しており、目標寸法の内径より3~4 μm 小さくなっていることが分かった。この値は主軸の回転振れに対応していると考えられる。つまり、目標寸法より、3 μm 程度小さい工具を製造すれば、早期に規格内に到達でき、ブランク材の無駄使いを抑制できる。

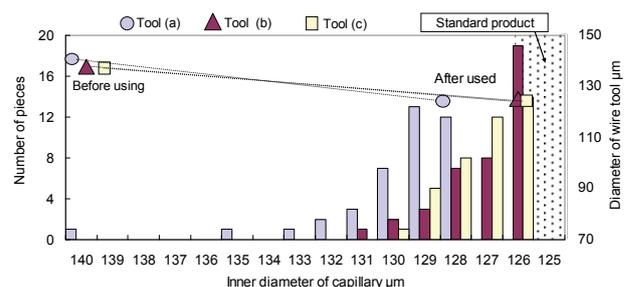


Fig.5 Continuance grinding test by difference of tool diameter

4.2 歩留まりの向上 良品（規格品）の歩留まりを向上させるためには、ブランク材の無駄使いを最小にして早期に規格内に収めることが重要である。そこで、使用前の工具径を主軸の振れを考慮して $\phi 126\mu\text{m}$ 、 $\phi 125\mu\text{m}$ 、 $\phi 124\mu\text{m}$ に抑えたテーパワイヤ工具を製作した。砥粒には、工具径の調整がしやすいノンコートダイヤモンド（平均粒径 $13\mu\text{m}$ ）を採用して行った。図6に3本の工具による良品の歩留まりについて検討した結果を示す。夫々の工具によるキャピラリの不良品は、工具径 $126\mu\text{m}$ （工具 a）で2個、 $125\mu\text{m}$ （工具 b）、 $124\mu\text{m}$ （工具 c）で最小単位の1個にすることができた。良品の個数も10個以上可能である。ここで良品の個数に着目すると、工具 c では下限の $125\mu\text{m}$ で最大の個数を推移しているのに対し、工具 a と b では $125.5\mu\text{m}$ で最多となっている。つまり、使用前の工具径を $125\mu\text{m}$ （工具 a）～ $126\mu\text{m}$ （工具 b）にすれば、キャピラリの不良品を2個以内に抑えて、良品の個数をさらに増加でき、歩留まりを向上できることが分かった。この結果、提案したテーパワイヤ工具は実用性の高い工具であることが示された。

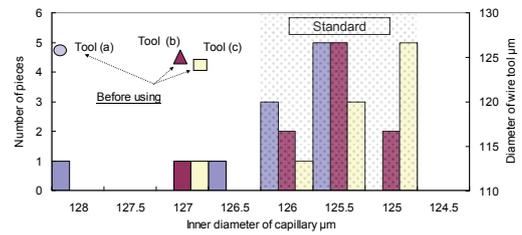


Fig.6 Evaluation of product yield

4.3 加工精度の評価 図7に研削後のキャピラリ内面の表面粗さRaとSEM写真を示す。(1)はNiコートダイヤモンド（粒径 $5\sim 12\mu\text{m}$ ）による結果を、(2)はノンコートダイヤモンド（平均粒径 $13\mu\text{m}$ ）による結果を示している。使用する砥粒径により加工後の面精度に 50nm 程度の差が出ているが、表4に示した精度を(1)、(2)共に達成した。また、写真上でPC面側のエッジ部に多少のだれと表面の凹凸が観察されるが、接合時には 0.1mm 程度研磨除去されるため、影響は無い。一方、真円度の精度は使用する砥粒のサイズに影響するが、(1)、(2)共に要求された精度を達成した。

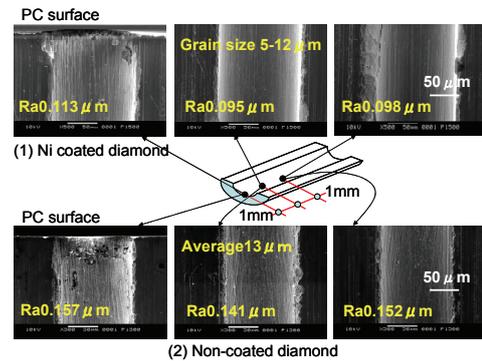


Fig.7 Surface roughness of ground hole

5. 結言

ジルコニアキャピラリの生産性を上げるために、試作した全自動内径研削盤と提案したテーパワイヤ工具を使用し、工具の断線防止策、研削回数、良品の歩留まり、研削盤と工具の実用性について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 切屑や脱粒砥粒の喰い付きによる工具の断線を回避するためには、1回の振動で確実にキャピラリが工具から離れることが重要であり、振動の最大速度と加工反力による弾性変形量を考慮すれば離脱できる。本研究では、クランプ間隔 300mm で、振動振幅 38Hz 、 3mm 以上で十分対応できることを検証した。
- 2) テーパーワイヤ工具の形状はテーパが長いほど工具寿命が長くなり、ストレート部が長いほど、工具の安定性が向上して、同一寸法の研削品が多く加工できる。本研究では、クランプ間隔 300mm で20個を達成するための工具形状は、テーパ $60\sim 100\text{mm}$ 、ストレート $50\sim 60\text{mm}$ が最適と考える。
- 3) 使用前の工具径は、キャピラリの規格サイズから主軸の振れを差し引いた値で決定する必要がある。これにより、良品の歩留まりを向上できる。
- 4) 試作した内径研削盤とテーパワイヤ工具を使用して、キャピラリの内径を60個以上研削できることを示した。このときの加工時間は一工程30秒以内を実現し、試作機と工具の実用性とキャピラリ内径研削の要求を満たした。