

三次元位置精度，形状測定技術に関する研究（第3報）

機械金属部 機械研究室
田中久，副島辰夫

産業の空洞化が進む中，21世紀に向けて企業活動を継続するためのキーワードとして新製品開発，高付加価値・高精度加工の実現，生産性向上によるコスト低減等が考えられる。この中の高付加価値・高精度加工の実現に関しては品質工学のパラメータ設計法が有効であり，平成6年より佐賀県品質工学研究会の成果事例として公開してきた。本研究では企業の円筒研削工程を実験の場として用い，超硬材料の各種研削条件の最適化を行い，より高精度な加工を達成することを目的とした。特性値として外径寸法，円筒度及び外周の振れを考え，同時にサイクルタイムを参考値として計測した。直径を特性値とした場合は，砥石周速，ワーク回転速度，トラバース速度，ドレッシング時の砥石速度とドレッシング回数が有意となり，各要因の最適水準値を設定することで，標準偏差で $0.8\mu\text{m}$ の精度向上が可能となった。また，円筒度及び外周の振れについては各水準間に有意差はなかった。

1. はじめに

近年，工作機械はシステム設計，電気・電子工学等の高度化が進み，静的・動的精度が飛躍的に向上してきた。特に，NC工作機械の登場で，熟練者のカンと経験に頼っていた以前の物作りとは異なり，経験の浅い技術者に任せても一定レベルの精度が確保できる時代となった。しかし，生産活動の海外シフトが進み，産業の空洞化に拍車がかかっている現在では，機械任せの加工精度では東南アジア諸国とのコスト競争において不利になるのは周知のとおりである。そこで，多くの企業では，将来に亘り企業活動を継続するために高付加価値・高精度加工の実現が大きな努力目標となっている。

本研究では，ドリル，エンドミル，タップ等の超硬工具の製作工程である焼結後の円筒研削工程に着目し，その研削条件を最適化し，現状よりも高精度な加工を達成することを目的としている。

2. 実験方法

実験は，共同研究先の企業が所有する円筒研削盤を用い，被削材は焼結後の超硬素材（ $\phi 12.80 \times 60\text{L}$ ， $\phi 16.80 \times 50\text{L}$ ）を2種類用いた。焼結後の素材は真直度及び真円度不良等が発生しており，それらの欠陥を除去するための取り代は直径で約 0.8mm である。

本研削工程後にドリル，エンドミル，タップ等の完成品になり，一般に本研削工程の加工精度が製品精度に大きく影響を与えられている。完成品になり，一般に本研削工程の加工精度が製品精度に大き

く影響を与えていると言われている。

現在，超硬の研削にはダイヤモンド砥石が多く適用されているが，ダイヤモンド砥石の切れ味は単に砥粒の種類だけではなく結合剤の種類，粒径の大きさ等で異なり，目的に合った砥石を合理的に選択するかが加工精度及び研削コスト面で重要なポイントとなっている。ダイヤモンド砥石の選択以外にも加工精度向上のポイントとなるのが加工条件とドレッシング条件である。

以上のことを考慮して研削精度向上のために考えた要因は表1に示す8個である。ダイヤモンド砥石粒度（A）とは砥粒の大きさであり，#230（粒径の大きさが $70\sim 90\mu\text{m}$ ）と#170（ $110\sim 130\mu\text{m}$ ）の2水準とした。尚，結合剤は砥石の成形性が容易なトリファイドボンドを選択した。砥石周速（B）は砥石の回転速度のことであり， 1300m/min ， 1500m/min ， 1700m/min の3水準とした。ワーク回転速度（C）とは研削時のワーク回転数のことであり， 100rpm ， 140rpm ， 200rpm の3水準を選定した。円筒研削はプランジ研削とトラバース研削に大別される。プランジ研削は砥石の幅をワークの研削幅より広くとりワークの加工面を同時に研削できるので研削能率がよい。一方，トラバース研削は砥石の回転運動とワークの回転運動およびワークの軸方向への往復運動によってワークの外周を研削する方法であり，一般にはよい仕上げ面が得られる研削方法であるが，テーブル往復運動に時間がかかり研削能率がプランジ研削に比較して劣る。本研究では，高能率に研削するた

表1 制御因子および水準値

		1	2	3
ダイヤモンド砥石粒度	(A)	#230	#170	
砥石周速	m/min (B)	1300	1500	1700
ワーク回転速度	rpm (C)	100	140	200
プランジ速度	mm/min (D)	0.2	0.3	0.4
トラバース速度	mm/min (E)	100	150	200
ドレッシング時砥石周速	m/min (F)	800	1000	1200
ドレッシング時切込み量	mm/回 (G)	0.01	0.02	0.03
ドレッシング回数	回 (H)	3	2	1

めに、まずプランジ研削による荒研削を分割して行った後でトラバース研削によって仕上げ研削する方法を採用した。

プランジ研削時の砥石の切り込み速度であるプランジ速度 (D) を 0.2mm/min, 0.3mm/min, 0.4mm/min の 3 水準, トラバース研削時のテーブルの移動速度であるトラバース速度 (E) を 100mm/min, 150mm/min, 200mm/min の 3 水準設定した。

ドレッシングとは、研削過程で摩耗した切れ刃の形状を正常な形に整えたり、チップポケットにつまった切り屑を取り除いたり、そして砥粒を保持する結合剤を削り取ることによって、砥粒の突き出し高さを調整し、適度なチップポケットを作る作業のことである。ダイヤモンド砥石の場合は比較的軟らかいGC砥石を用いてドレッシングを行うが、ドレッシング時のダイヤモンド砥石の回転速度であるドレッシング時砥石周速 (F) を 800m/min, 1000m/min, 1200m/min の 3 水準考え、またドレッシング時の切込み量 (G) を 0.01mm/回, 0.02mm/回, 0.03mm/回, またドレッシング回数 (H) を 1 回, 2 回, 3 回とそれぞれ 3 水準設定した。

以上 8 個の制御因子と水準値をまとめたものが表 1 である。次に、制御因子 A～H を表 2 に示す直交表 L_{18} ¹⁾ の 1 列から 8 列にわりつけた。実験は直交表に従って 18 種類の研削条件で加工を行った。信号因子は超硬素材の直径とし、1 条件での加工サンプル数は ϕ 12.80, ϕ 16.80 で各 5 本とした。なお、現行条件は砥石粒度 (A) が第 1 水準で、その他の要因については第 2 水準である。

3. 結果および考察

実験で得られた試料の直径をレーザ式直径測定器を用いて測定した。本実験の場合、信号因子すなわち

表2 L_{18} 直交表

	ダイヤモンド砥石粒度 (A)	砥石周速 (B)	ワーク回転速度 (C)	プランジ速度 (D)	トラバース速度 (E)	ドレッシング時砥石周速 (F)	ドレッシング時切込み量 (G)	ドレッシング回数 (H)	データ
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	
9	2	3	3	1	3	2	1	2	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	

入力を M とし、 $M=0$ の時出力 (直径) y がゼロであることが明らかであるので、比例式 $y = \beta M$ が理想的である考えた。得られたデータから直交表 L_{18} の実験番号ごとに比例式の SN 比²⁾を求める手順を以下に示す。

信号因子 M_1 (ϕ 12.80) のデータを y_{11} , y_{12} , y_{13} , y_{14} , y_{15} とし、 M_2 (ϕ 16.80) のデータを y_{21} , y_{22} , y_{23} , y_{24} , y_{25} とした場合、全変動 S_T と信号因子の一次効果 S_β は次の式で計算する。

S_T = 個々のデータの 2 乗和

$$= y_{11}^2 + y_{12}^2 + \cdots + y_{24}^2 + y_{25}^2$$

$$S_\beta = 1/r (M_1 y_{11} + M_2 y_{21})^2$$

ここで、 r は有効除数と呼ばれ、 $r = r_0 (M_1^2 + M_2^2)$ である。 r_0 は繰り返し数で本実験では $r_0 = 5$ となる。また、 $y_1 = y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15}$ 、 $y_2 = y_{21} + y_{22} + y_{23} + y_{24} + y_{25}$ である。次に、誤差変動は

$$S_e = S_T - S_\beta$$

となり、誤差分散は、これを誤差の自由度 f_e （データ数 - 1 = 9）で割って

$$V_e = S_e / f_e$$

となる。したがって、SN比 η は

$$\eta = 1 / (r V_e) \times (S_\beta - V_e)$$

で求まる。

以上の手順で求めたSN比を表3に示す。次に、SN比を新しい特性値として分散分析を行った結果を表4に示す。

表3 実験番号ごとのSN比 (dB)

実験番号	SN比	実験番号	SN比	実験番号	SN比
1	51.28	7	50.62	13	48.93
2	50.63	8	49.69	14	51.83
3	49.12	9	48.53	15	47.95
4	51.22	10	49.43	16	50.02
5	48.60	11	49.96	17	50.83
6	49.01	12	50.24	18	48.60

同表より、直径のばらつきに影響を与えている要因は、寄与率の大きい順にワーク回転速度 (C)、ドレッシング回数 (H)、トラバース速度 (E)、ドレッシング時砥石周速 (F)、砥石周速 (B) であった。

その他の要因であるダイヤモンド砥石粒度 (A)、プランジ速度 (D)、ドレッシング時切込み量 (G) の分散の大きさは誤差分散 (V_e) と大差なく、各要因の水準間に差がないと考えても差し支えないことが判った。

表4 分散分析表

要 因 名		平方和	自由度	分 散
ダイヤモンド砥石粒度 (A)		0.044	1	0.044
砥石周速 (B)		0.883	2	0.442
ワーク回転速度 (C)		7.212	2	3.606
プランジ速度 (D)		0.399	2	0.200
トラバース速度 (E)		3.078	2	1.539
ドレッシング時砥石周速 (F)		1.636	2	0.818
ドレッシング時切込み量 (G)		0.770	2	0.385
ドレッシング回数 (H)		6.520	2	3.260
誤 差 (e)		0.346	2	0.173
合 計 (T)		20.888	17	

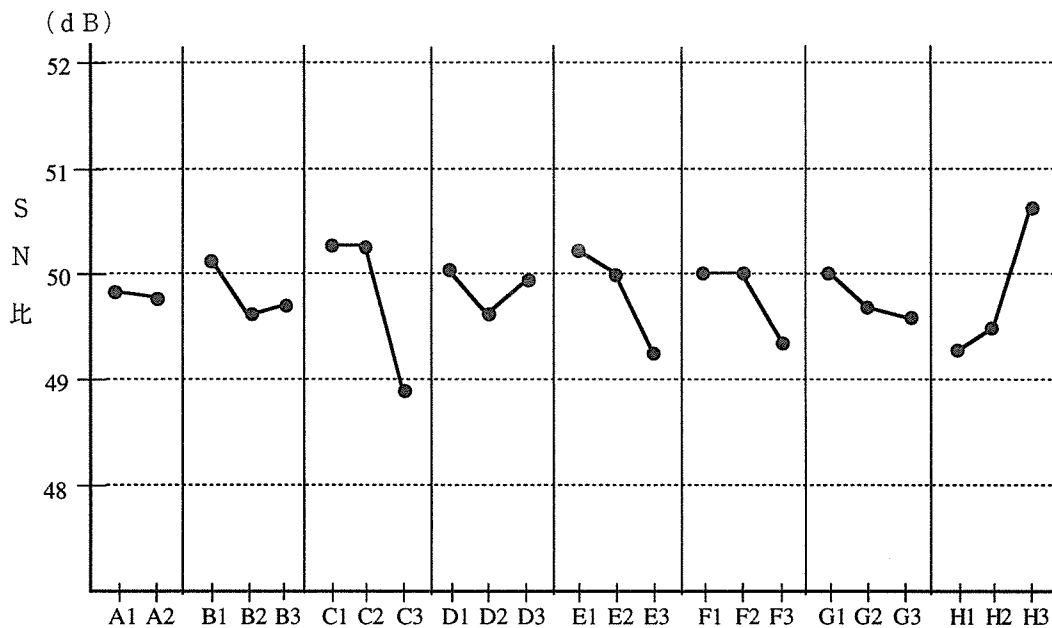


図1 要因効果図

次に、制御因子の水準毎のS N比の平均値を求め、グラフにしたものが図1の要因効果図である。同図から、ワーク回転速度については、S N比が大きい第1水準（100rpm）または第2水準（140rpm）を選択する方が、またドレッシング回数は短時間に1パスで完了する第3水準（1回）の方が直径のばらつきが小さくなることが判った。ワーク回転速度、トラバース速度、砥石周速、ドレッシング時砥石周速については、今回採用したダイヤモンド砥石との組み合わせで有意差が発生したものと推定され、それぞれS N比の大きい水準を採用した。

本実験で用いたビトリファイドボンド系ダイヤモンド砥石粒度の效果に差がなかったことから、研削能率が良く、ドレッシング間隔が長い# 170を選択できることが判った。以上の結果から、本実験での最適組み合わせは、A 2+ B 1+ C 2+ D 3+ E 1+ F 2+ G 1+ H 3となり、現行条件とは異なる水準を選択することで、研削加工後の直径のばらつきが小さくなることが判った。次のステップは実験効果の確認である。そこで、最適組み合わせで再度研削加工を実施し、得られた直径データからS N比を求めた。最適条件と現行条件でのS N比は、

現行条件のS N比 $\eta = 49.95 \text{ dB}$ ($\sigma = 3.18 \mu\text{m}$)

最適条件のS N比 $\eta = 52.30 \text{ dB}$ ($\sigma = 2.43 \mu\text{m}$)

となり、S N比で2.35dB、直径のばらつきの標準偏差で0.75 μm の改善が確認された。

4. おわりに

今回、超硬材料の円筒研削加工における各種研削条件を最適化する実験を実施したが、その結果をまとめると以下のとおりである。

(1) ビトリファイドボンド系ダイヤモンド砥石を用いて円筒研削する場合、研削後の直径のばらつきに影響を与えている要因は、寄与率の大きい順にワーク回転速度、ドレッシング回数、トラバース速度、ドレッシング時砥石周速、研削加工時の砥石周速であった。

(2) ダイヤモンド砥石粒度の效果に差がなかったことから、研削能率が良くドレッシング間隔が長い# 170を選択できることが判った。

(3) 本実験での最適組み合わせはダイヤモンド砥石粒度（# 170）、砥石周速（1300m/min）、ワーク回転速度（140rpm）、プランジ速度（0.3mm/min）、トラバース速度（100mm/min）、ドレッシング時砥石周速（1000m/min）、ドレッシング時切込み量（0.01mm/回）およびドレッシング回数（1回）となった。確認実験を行った結果、S N比で2.35dB、直径のばらつきの標準偏差で0.75 μm の改善が確認された。

(4) 直径以外の特性値として円筒度と外周の振れについても検討した。サンプル数が少ないことの影響も考えられるが、実験で取り上げた各制御因子の水準間に差が認められなかった。

尚、本研究は日本ハードメタル（株）との共同研究である。

参考文献

- 1) 矢野宏：品質工学入門，日本規格協会（1995）
- 2) 矢野宏編：加工品質工学，工業調査会（1994）