

金型材料の高能率加工に関する研究 — 増速スピンドルを用いた切削条件の最適化 —

機械技術部 岩本竜一, 森田春美, 南 晃

Study on high efficient cutting for die steels
- Optimization of cutting condition by spindle speeder -

Ryuichi IWAMOTO, Harumi MORITA and Akira MINAMI

近年、金型材料に代表される高硬度材料の加工法として、高速切削という展開が見られ、成果が上がっている。本研究では、これらの高速加工に関する研究の前段階として、現有するNCフライス盤に増速スピンドルを取り付けて加工実験を行い、品質工学の手法を用いて距離と方向それぞれのデータを解析し、切削条件の最適化を行った。この結果、距離では、切り込み、切削油、工具突出量、送り速度の順に効果が大きい要因であることが分かった。また、方向では、切り込み、ピックフィード、切削油、切削方向の順に効果が大きい要因であることが分かった。いずれの場合でも切り込みの効果が最大であった。これらをもとに最適条件を推定し確認実験を行った結果、推定値に近い利得が得られた。

1. 緒言

一般に、金型材料のような高硬度材の切削加工は、加工に長時間を要する、工具摩耗が激しい、工具費が高い等の問題が多く発生する。これらの問題に対して、業界では既に工具や切削条件の変更等の多くの改善がなされてきた。しかし、製作コストの低減、納期の短縮の要請は止まることがなく、工具や切削条件の変更等の対策ではこれらの要請に応えることが難しくなっている。

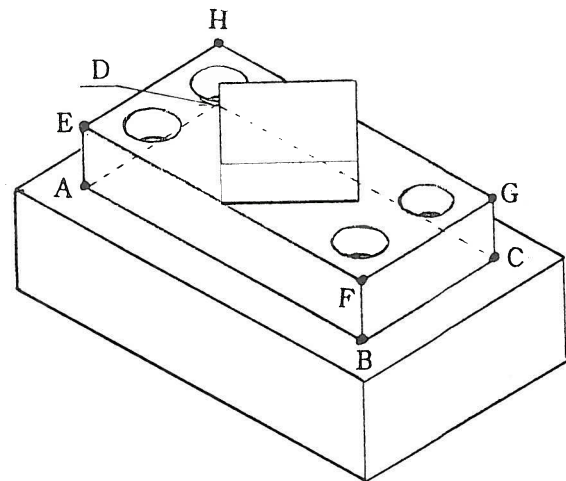
近年、これらの高硬度材料の加工法として、高速切削という新規な展開が見られる。主軸を数万回転の高速で回転させ、各軸の送り速度も数十メートル/分で移動させ加工しようとするものである。

本研究では、これらの高速加工に関する研究の前段階として、現有するNCフライス盤に増速スピンドルを取り付けて加工実験を行い、高速加工時に生じる諸問題を品質工学の手法を用いて抽出しようとするものである。

2. 実験方法

2.1 実験の計画

実験は、SKD11(120×60×50mm, H_{Rc}40程度)のブロックをマシニングセンタ(三井精機工業 VS5A)により粗加工を行い、NCフライス盤(牧野フライス AG11UNC-85)に増速スピンドル(NIKKEN BT40-NX5-153)を取り付け、R2.5のボールエンドミルにて図1の形状に仕上げ加工を行う。加工後は、三次元測定機により図中の頂点座標の測定を行い、品質工学の手法を用いて解析する。なお、図中の付表は後述の信号因子との対応表である。



付表 測定ポイントに対応する信号因子

	距離	方向
A B 間	M ₁	M ₈ M ₉
A D 間	M ₂	M ₁₀ M ₁₁
A E 間	M ₃	M ₁₂ M ₁₃
A C 間	M ₄	M ₁₄ M ₁₅
A H 間	M ₅	M ₁₆ M ₁₇
A F 間	M ₆	M ₁₈ M ₁₉
A G 間	M ₇	M ₂₀ M ₂₁

図1 試験材の形状と測定ポイント

2.2 制御因子

今回の実験で取り上げた8つの要因を表1に示す。切削速度および送り速度は可能な限り高速加工に近づけるためマシンスペックの最大から低い側へ3水準選定した。これらの要因を表2のようにL₁₈直交表に割り付けた。

表1 制御因子と水準値

要因	水準			単位
	1	2	3	
A: 切削方向	upcut	downcut		
B: 切削速度*1	110	141	173	m/min
C: 送り速度	0.05	0.07	0.09	mm/刃
D: 切り込み	0.2	0.4	0.6	mm
E: 工具材種*2	粉末ハイス	コーティッド	超硬	
F: 工具突出量	30	40	50	mm
G: 切削油量*3	無	有(少)	有(多)	
H: ヒックフィード	0.2	0.4	0.6	mm

表2. L_{18} 直交表への制御因子の割付

No	制御因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
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
⋮								
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

2.3 信号因子

NC工作機械の場合、入力したNCデータ(寸法等)通りの加工が出来ることが理想である。したがって、本実験ではNC入力値の原点座標から計算で求めた距離および角度を信号因子とした¹⁾。

2.4 誤差因子

工作機械のベッド上で部品加工等を行う場合、ベッドのどこで加工しても、全く同じ形状の加工がなされなければならない。しかし、一般の工作機械は各軸の一端にマシン原点を持ち、マシン原点を基準にしてNCの指令値により移動している。このため、マシン原点から離れた位置では環境温度の変化、加工中の発熱、切削液の温度変化等により誤差が出る可能性が考えられる。よって、仕上げ加工の際の加工位置を誤差因子とした。具体的には、ベッド中央部で加工したものを N_1 、マシン原点から離れた側(ベッド左端)で加工したものを N_2 とした。

3. 形状の測定

仕上げ加工後の製品を三次元測定機(MITUTOYO FT 1006)により、X、Y、Z、XY、YZ、ZX、XYZの方向について頂点間の距離、方向を測定した。頂点座標は頂点を構成する3平面の交点座標とした。なお、方向は、X軸上を0とし、Z軸を回転中心とする反時計回りの角度と、Z

軸上を0としてZ軸からのなす角度の2つの角度を用いて三次元空間上の頂点間の方向を表した。

これらの測定結果の一例を表3に示す。

表3. 距離、方向の測定結果(第1行目)

測定位置	信号因子	ベッド中	ベッド左	
距離	M_1	100.000	100.538	100.833
	M_2	40.000	40.436	40.688
	M_3	15.000	15.062	15.019
	M_4	107.703	108.322	108.737
	M_5	42.720	43.111	43.193
	M_6	101.119	101.620	101.818
	M_7	108.743	109.311	109.581
方向	M_8	0.000	359.5651	359.5347
	M_9	90.000	89.5935	90.0001
	⋮	⋮	⋮	⋮
	M_{21}	82.071	82.0244	82.0548

4. データの解析

4.1 SN比の計算

NC工作機械への入力データをMとし、加工寸法をyとしたとき $y = \beta M$ の関係が成立する。信号因子がゼロであれば加工寸法もゼロであることが理想であることから、ゼロ点比例式のSN比を求め解析した²⁾。表3のデータを用いて算出した結果を一例として以下に示す。

・全2乗和

$$S_T = 100.538^2 + 40.436^2 + \dots + 109.581^2 \\ = 95950.2052$$

・線形式

$$L_1 = 100.000 \times 100.538 + 40.000 \times 40.436 + \dots \\ + 108.743 \times 109.311 = 47567.99514$$

$$L_2 = 100.000 \times 100.833 + 40.000 \times 40.688 + \dots \\ + 108.743 \times 109.581 = 47704.5121$$

・有効除数

$$r = 2 \times (100.000^2 + 40.000^2 + \dots + 82.071^2) \\ = 94600.0536$$

・比例項の変動

$$S_B = (L_1 + L_2)^2 / r \\ = 95949.7409$$

・誤差変動

$$S_e = S_T - S_B \\ = 95950.2052 - 95949.7409 \\ = 0.46434$$

*1 ボールエンドミルの切れ刃外周での切削速度を示す。このため切り込みの違いにより実際の切削速度は異なる。なお、主軸回転数はそれぞれ7000, 9000, 11000rpmである。

*2 粉末ハイス OSG CPM-EBD R2.5, コーティッドハイス OSG EX-TIN-EBD R2.5, 超硬 OSG MG-EBD R2.5

*3 不水溶性切削油(エソNo3)

・誤差分散

$$V_e = S_e / (n-1) = 0.0357185$$

・SN比

$$\eta = 10 \log \{ (S_\beta - S_e) / V_e \cdot r \} = 14.53(\text{db})$$

・感度

$$S = 10 \log \{ (S_\beta - S_e) / r \} = 0.062(\text{db})$$

これと同様に他の行および方向データについても解析を行った。

4.2 欠測値の処理

実験において、工具の摩耗等により測定に必要な部位を加工できない条件があった。これらについては、他の行で求められたSN比の最小値に-3dbを加算した。感度は他の行から求められた平均値とした。この結果を表4に示す。

表4. 距離および方向別の解析結果

No	距離		方向		備考
	η (db)	S (db)	η (db)	S (db)	
1	14.53	0.062	-33.28	7.63	
2	9.94	0.064	-37.84	5.60	
3	2.51	0.005	-37.02	5.69	
4	15.45	0.040	-33.61	7.62	
5	3.70	-0.009	-35.26	5.80	
6	10.55	0.122	-35.34	7.54	
7	15.74	0.072	-35.97	5.74	
8	12.36	0.095	-36.92	5.67	
9	0.79	-0.059	-35.25	5.81	
10	7.35	-0.037	-36.81	5.70	
11	17.14	0.099	-35.96	5.74	
12	-2.21	0.041	-40.84	6.22	加工不能
13	16.12	0.029	-36.98	5.67	
14	-2.21	0.041	-40.84	6.22	加工不能
15	13.73	0.064	-32.94	7.64	
16	-2.21	0.041	-40.84	6.22	加工不能
17	27.01	0.011	-37.33	5.65	
18	10.14	0.118	-34.22	5.83	

表5. 2 SN比と感度の補助表(方向)

	SN比 η の平均			感度Sの平均		
	1	2	3	1	2	3
A: 切削方向	-35.61	-37.42	-	6.34	6.10	-
B: 切削速度	-36.96	-35.83	-36.76	6.10	6.75	5.82
C: 送り速度	-36.25	-37.36	-35.94	6.43	5.78	6.46
D: 切り込み	-34.73	-36.85	-37.96	6.68	5.81	6.17
E: 工具材種	-35.94	-37.17	-36.44	6.45	6.50	5.72
F: 工具突出量	-36.78	-36.43	-36.33	6.40	6.13	6.14
G: 切削油量	-37.72	-36.04	-35.79	6.32	6.31	6.04
H: ピックフィード	-34.91	-37.04	-37.60	6.38	6.09	6.19

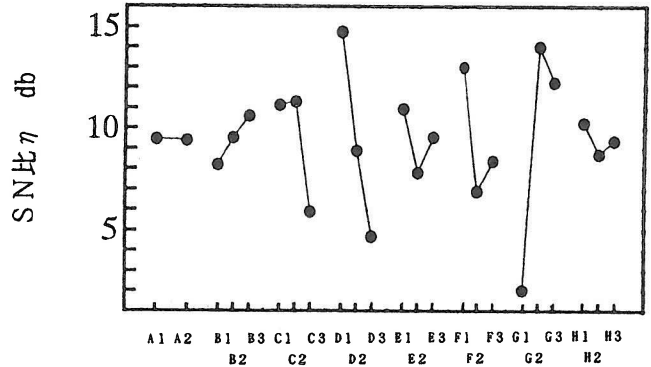


図2. 1 要因効果図(距離)

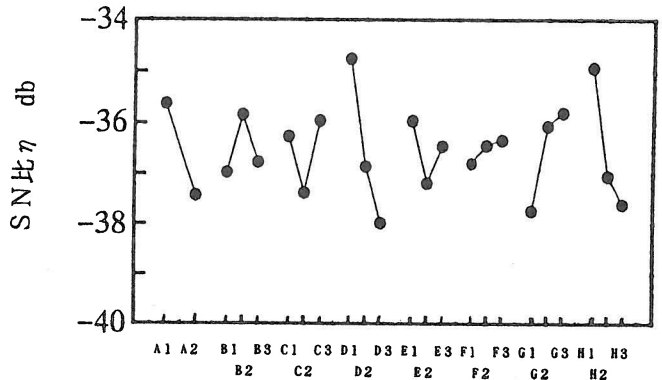


図2. 2 要因効果図(方向)

このようにして求めたSN比をもとにして、各制御因子の効果を求めるため制御因子の各水準毎のSN比を求めた。この補助表を表5. 1~2に示す。さらに、この補助表から要因効果図を作成した。これを図2. 1~2に示す。

表5. 1 SN比と感度の補助表(距離)

	SN比 η の平均			感度Sの平均		
	1	2	3	1	2	3
A: 切削方向	9.50	9.42	-	0.044	0.046	-
B: 切削速度	8.21	9.56	10.64	0.039	0.049	0.047
C: 送り速度	11.16	11.32	5.92	0.035	0.051	0.049
D: 切り込み	14.78	8.91	4.73	0.036	0.053	0.046
E: 工具材種	10.98	7.84	9.58	0.086	0.053	0.001
F: 工具突出量	13.06	6.91	8.41	0.061	0.029	0.046
G: 切削油量	2.07	14.05	12.29	0.022	0.049	0.064
H: ピックフィード	10.30	8.72	9.38	0.049	0.050	0.036

5. 制御因子の効果の検討

図2の要因効果図から明らかなように、距離に効果の大きい要因はD(切り込み)、G(切削油)、F(工具突出量)、C(送り速度)の順であり、方向に効果の大きい要因はD(切り込み)、H(ピックフィード)、A(切削方向)、G(切削油)の順である。このように距離と方向に及ぼす要因の効果は一致していない。また、それぞれの要因の効果は、総平均値からの差が大きい距離の方が方向よりも大きいことが分かる。

要因別では、D(切り込み)の効果が距離、方向の両方で最も大きい。C(送り速度)、F(工具突出量)は距離への効果は大きい、方向についてはそれほど大きくない。逆に、A(切削方向)は距離の効果が小さく、方向の効果が大きい。

6. 最適条件の推定と確認実験

6.1 最適条件の推定

前節で述べたように、距離の要因効果図と方向の要因効果図の傾向は一致していない。そこで今回は、SN比の総平均値からの差が大きい距離のSN比を用いて最適条件の推定を行った。

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= C_2 + D_1 + F_1 + G_2 - 3\bar{T} \\ &= 11.32 + 14.78 + 13.06 + 14.05 - 3 \times 9.47 \\ &= 24.80(\text{db})\end{aligned}$$

\bar{T} は距離のSN比の総平均値

また、現行条件を第2水準とした時のSN比の推定値 $\hat{\mu}$ は

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= C_2 + D_2 + F_2 + G_2 - 3\bar{T} \\ &= 11.32 + 8.91 + 6.91 + 14.05 - 3 \times 9.47 \\ &= 12.78(\text{db})\end{aligned}$$

これより、推定による利得は

$$\begin{aligned}\text{最適条件 } \hat{\mu} - \text{現行条件 } \hat{\mu} &= 24.80 - 12.78 \\ &= 12.02(\text{db})\end{aligned}$$

となる。

6.2 確認実験

実験結果の再現性を検討するために表6に示す条件で確認実験を行った。確認実験の結果を表7に示す。表7中の方向に関する推定値および確認実験の結果は、前節で述べた同じ条件で計算したものである。

表6. 確認実験の条件

制御因子	最適条件	現行条件
A: 切削方向	(A1) upcut	(A1) upcut
B: 切削速度	(B3) 173m/min	(B2) 141m/min
C: 送り速度	(C2) 0.07mm/刃	(C2) 0.07mm/刃
D: 切り込み	(D1) 0.2mm	(D2) 0.4mm
E: 工具材種	(E1) 粉末ハイス	(E2) コーティング
F: 工具突出量	(F1) 30mm	(F2) 40mm
G: 切削油量	(G2) 少	(G2) 少
H: ヒックフィード	(H1) 0.2mm	(H2) 0.4mm

表7. SN比の推定値と確認実験の結果

		推定値(db)	確認実験(db)
最適条件	距離	24.80	17.96
	方向	-35.37	-45.85
現行条件	距離	12.78	2.76
	方向	-37.14	-45.77
利得	距離	12.02	15.20
	方向	1.77	-0.08

確認実験の結果、最適条件は現行条件に比べ推定値とはほぼ同様な利得が得られた。

7. 考察

この実験は、現有する設備を使って高速加工を行おうとしたものであったが、仕上げ加工中(特に側面切削中)に大きなびびりが発生するという問題が生じた。この原因としては、主軸周りの剛性の不足が考えられる。本来、増速スピンドルは、小径ドリルによる穴あけ加工の切削速度の不足を補うために使用されることが多く、横方向の剛性はそれほど高くない。また、加工中に増速スピンドルの振動が見られたことも主軸周りの剛性不足を疑わせるものである。しかし、この剛性不足が増速スピンドルによるものか、あるいは工具そのものの剛性不足によるものかは今後検討を要する。

剛性の不足から発生していると思われる振動あるいはびびりにより、実験に用いた超硬のボールエンドミルの側面切れ刃は全てチップングしていた。超硬のボールエンドミルを用いて、Z方向に切り込みを与えた加工面は、他の加工面に比べ良好であり、工具摩耗も少ない。しかし、今回の実験では、三次元測定機を用いて3つの平面がなす頂点座標を用いて形状精度を表したため、YZ、ZX平面の加工時にチップングしてしまう超硬では、XY平面がいかに良好に加工できても、測定結果としての形状精度は著しく劣化してしまう。この結果、工具摩耗は大きかったもののチップングしなかったハイスが良好な形状精度で加工できるという結果になったものと考えられる。

金型の加工を考慮した場合、ハイスで加工した面は工具摩耗の進行により、むしろ面となっており、形状精度が良好でも磨き工程に多くの工数を必要とすることが予想される。一方、コーティッドハイスは、加工後にはコーティング層がほとんど無くなっていた。加工時に発生する熱によるものと思われる。冷却性の高い水溶性の切削剤の使用も検討するべきと考えられる。

金型の加工は、磨き工程の省力化に力が入れられており、この点で加工面が良好な超硬の選択が適切であろう。工具の選定は、ハイス、コーティッドハイス、超硬という割付ではなく、超硬の中で硬さおよびじん性の異なるもの(例えばP種、M種、K種)を選ぶべきであったらう。

実験に用いたNCフライス盤は切削油のノズルが1本だけしかなく、ワークの形状によって切削油のかかりにくい部位があった。要因効果図からも切削油の効果は大きいことから、切削油のかけ方、または割り付けの不具合があったと思われる。

効果の一番大きかった要因である切り込みは、これほど効果が大きいと予想していなかったため、荒削り用のラフィングエンドミルで加工代を作り、ノグスで確認した程度であった。ラフィングエンドミルのバックテーパ等の影響も否定できないため、中仕上げ工程を入れてより正確な加

工代を作っておく必要がある。

切削速度、送り速度については工具外周切れ刃部（工具直径）を用いて算出している。ボールエンドミルの場合、切り込みの違いにより実際の切削速度および1刃当たりの送り量は変わる。今後、複雑な三次元形状を加工する際に、この問題をどのように取り扱うか課題が残された。カッターパスも関係するため、作成方法も含め検討すべきである。

データの解析の方法では、方向データの計算処理方法が問題となった。方向を角度で表したため、表3中のM₃等に見られるように信号因子が角度0°であった場合、測定結果が359.5651°となることがある。これを-0.4349°とすべきなのかどうか判断に迷ったが、本稿では測定結果をそのまま使って解析を行った。他にも角度を信号因子としたことに起因するこれと類する問題がいくつか発生した。

このように、方向データの解析において角度を用いる方法では、その処理方法が問題になる。そこで、現場での作業にはなじみにくく、データの計算量が増えること等の問題もあるものの、角度の変わりに方向余弦で表現し直して再解析した。

方向余弦は頂点間距離を1とする各軸方向の無次元長さ（つまり距離データ）といえるため、前述の問題を回避できると考えたからである。図3に、方向データを方向余弦で表現する方法を示す。また、この方法により表現されたデータの一例を表8に示す。

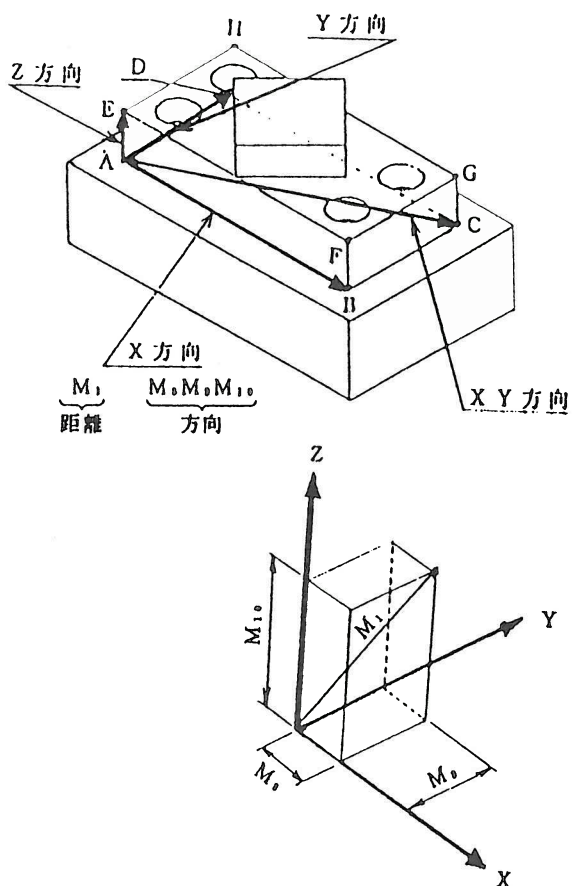


図3. 方向余弦による方向データの表現例

表8. 方向の測定結果（第1行目）

測定位置	信号因子	ベッド中	ベッド左	備考
M ₃	1	0.9999996	0.9999984	X方向
M ₉	0	-0.0009160	-0.0018080	
M ₁₀	0	0.0001204	-0.0000052	
M ₁₁	0	0.0018658	0.0009058	Y方向
M ₁₂	1	0.9999968	0.9999995	
M ₁₃	0	0.0017209	0.0003054	
M ₁₄	0	-0.0023300	0.0084639	
M ₂₈	0.137946	0.1383849	0.1375016	

これらのデータを解析した結果を表9および図4に示す。加工不能品のSN比は、他の行の最小値に-3dbを加算し、感度は平均値とした。

表9. 方向（方向余弦）の解析結果

No	η (db)	S (db)	備考
1	10.49065	-1.03103	
2	10.50142	-1.02875	
3	10.47385	-1.03458	
4	10.48980	-1.03121	
5	10.48283	-1.03268	
6	10.49473	-1.03017	
7	10.49351	-1.03042	
8	10.47466	-1.03441	
9	10.30261	-1.07144	
10	10.46756	-1.03592	
11	10.48889	-1.03140	
12	7.30261	-1.03469	加工不能
13	10.49516	-1.03007	
14	7.30261	-1.03469	加工不能
15	10.48870	-1.03144	
16	7.30261	-1.03469	加工不能
17	10.49106	-1.03094	
18	10.46800	-1.03582	

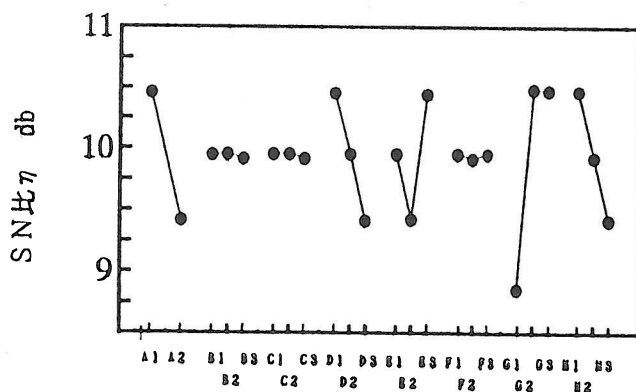


図4 要因効果図（方向）

図4を図2. 1および2. 2を比較すると、一部に逆転するデータがあるものの、効果の大きい要因に対しては良く一致している。

しかし、この図4で留意すべき点は、欠測値の扱いであると考えられる。図中のSN比が10.5db付近のデータは欠

測値を含まないもので、10.0db付近のデータは欠測値を1つ含むもの、9.4db 付近のデータは欠測値を2つ含むもの(要因Aは2水準のため欠測値を3つ含む)、8.8db 付近のデータは欠測値を3つ含むものである。つまり、欠測値の処理方法による差が非常に大きいということである。

ここでは方向データの解析方法について検討しているので、欠測値にSN比の最小値から-3dbを加算するという処理の正当性を考慮する前に、欠測値が全く無かった場合には、方向データの解析結果として出てくるSN比の差は非常に小さくなる可能性が大きいということに着目する必要がある。

したがって、方向余弦のデータからSN比を求める計算過程で必要な三角関数の引数の精度や0に近い値での除算等では計算機の丸め誤差に十分な注意が欠かせないということになる。あるいは丸め誤差対策として特別な計算方法が必要な可能性もある。

しかし、本実験では、SN比の総平均値からの差は方向データより距離データの方が大きくでるという結果が得られている。このことから、方向データの解析方法としては、方向データの解析は行わず、最初に、距離データの信号因子の中に方向成分を含んだ信号因子を設定し、この距離データの解析のみを行うことが良い方法ではないかと考えられる。さらに、製品形状や測定方法等の問題で、距離データの信号因子の中に方向成分を含ませることが出来ない場合に限り、角度あるいは方向余弦のデータを使って解析するという方法が良いと考えられる。この時、方向余弦を使うのであれば、頂点間距離を1として各軸成分を無次元化するのではなく、10あるいは100等の大きい値を使う計算上の工夫も許容されるであろう。

最後に、直接今回の実験結果とは関係がないが、主軸高速回転、高速送り、微少切り込みという加工を行う際の、カッターパスの作成方法についても多くの知見が得られた。また、高速送りになるほどNCの処理能力が必要であることも実感として体験することが出来た。

8. 結 言

以上の実験を行い、品質工学の手法を用いて距離と方向に分けて製品形状精度を解析した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 距離については、切り込み、切削油、工具突出量、送り速度の順に効果が大きい要因である。
- 2) 方向については、切り込み、ピックフィード、切削油、切削方向の順に効果が大きい要因である。
- 3) 切削方向はUPCUTの方が良い。
- 4) 切り込みは小さい方が良く、一番効果の大きい要因である。
- 5) SN比の総平均値からの差が大きい距離について最適条件を推定し確認実験を行った結果、推定値とほぼ同レベルの利得が得られ、実験の再現性を確認できた。
- 6) 距離データの信号因子の中に方向成分を含ませることが、方向データの解析方法として適当であると推定できた。

最後に、今回、初めて品質工学を適用した実験に挑戦したが、予想以上に多くの知見を得ることが出来た。これまでスタンダードな切削加工試験しか知らなかった筆者にとって、切削加工試験の重要性は認めつつも、品質工学の適用範囲の広さには驚かされるものがあった。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、実験の進め方、データの解析等でご指導いただきました計量研究所 計測数理研究室の皆様へ感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 上野憲造：“機能性評価による機械設計” 日本規格協会(1995)p.187
- 2) 田口玄一：“品質工学講座3 品質評価のためのSN比” 日本規格協会(1988)