NC ホブ盤の精度向上に関する研究*
(歯すじ誤差の改善)

上野健治, 東川隆英, 橋谷道明*

Study on the Improvement of Cutting Accuracy of NC Hobbing Machines
(Improvement of Tooth Lead Error)

Kenji UENO, Takahide TOOKAWA, and Michiaki HASHITANI

In this paper, with the purpose of achieving high precision machining by means of NC hobbing machines, the problem points of the NC indexing system software, the angle detection accuracy of the hob and table axes, and the achievement of high precision of synchronism of the two axes is investigated. With regard to the indexing system software, numerical simulation of the tooth lead error was carried out, and it was clearly shown that the size of the unit used in carrying out the calculation had a strong influence on the machining precision. In addition, it was recognized that the quantization of the hob spindle encoder and the table spindle angle detection device exerted a great influence on the machining precision. Together with these results, gear cutting machining was carried out by means of the actual machine, making it possible to achieve an improvement in the tooth lead error.

Key Words: Machine Tool, NC Hobbing Machine, High Precision Machining, Index, Tooth Lead Error

1. 緒 言

近年, ホブ盤においては, 割出し系を含む全移動軸のNC化の研究⁽¹⁾とその実用化⁽²⁾が相当すすんでおり, 歯切り現場でNCホブ盤が数多く使用されるようになった。建設機械, 歯車メーカーの多種少量, 中量生産の分野だけでなく, 自動車用歯車の加工ラインにも納入され始めた⁽³⁾。

このような背景を踏まえ, これまで高能率加工条件下における割出し系の精度についてテーブル軸の回転遅れ量を取り挙げNC化の問題点を明らかにした⁽⁴⁾。さらに, 生産能率向上におけるNC化の効果についても検討した⁽⁵⁾。本研究においては, NCホブ切りにおける高精度加工を目的として, ホブ軸とテーブル軸の角度検出器の定量化と, NC内部のソフトウェア上の処理方法における問題点について検討してみる。

2. 割出し系の分解能と精度

ホブ盤においてNC化する際に特に考慮しなければならないこととして, 割出し系の分解能と精度が挙

げられる。本研究で使用したホブ盤の駆動系統図を図1に, 制御方式を図2に示す。すなわち, ホブ軸の回転信号をNC装置に取り込み, テーブル軸を制御する方式である。このことから, ホブ軸とテーブル軸(以後ワーク軸ともいう)の基準信号の取り方を十分検討しておく必要がある。

いま, ホブ軸の回転速度を検出するエンコーダのパルス分割数を N_p とし, 1パルス当たりのホブ軸の回転角度を $\Delta\phi_h$ とすると, $\Delta\phi_h$ は次式で与えられる。

$$\Delta\phi_h = 2\pi/N_p \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

以下, $\Delta\phi_h$ に起因する量子化誤差について述べる。標準平歯車の場合, この $\Delta\phi_h$ による分割単位を歯車のピッチ円周長に換算した量子化誤差 ΔE_h は, 次のようにして求めることができる。いま, ホブの条数を g , 歯車の歯数を z とすると, ホブ軸が回転角度 $\Delta\phi_h$ 回転したときの歯車の回転角は,

$$\Delta\phi_h \cdot g/z \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

となる。これに歯車の半径 r を乗ずると ΔE_h が得られる。歯直角モジュールを m_n とすると,

$$\begin{aligned} \Delta E_h &= \Delta\phi_h \cdot g \cdot r/z \\ &= \frac{1}{2} \cdot \Delta\phi_h \cdot g \cdot m_n \quad \cdots \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

一方テーブル軸駆動モータの位置決め分解能, すな

* 昭和60年8月27日 第22回シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和62年8月21日。

*1 正員, 三菱重工業(株)京都精機製作所 (〒616 京都市右京区太秦巽町)。

わち歩進角を歯車のピッチ円周長に換算した量子化誤差 ΔE_w は、次のようにして求められる。いま、テーブル軸の駆動モータの歩進角を $\Delta\phi_w$ 、駆動モータ側からみた機械系の減速比を i とすると、テーブル軸においては、 $\Delta\phi_w \cdot i$ なる歩進角となる。 $\Delta\phi_w \cdot i$ に歯車の半径を乗じて式(4)を得る。

$$\Delta E_w = \frac{1}{2} \cdot \Delta\phi_w \cdot i \cdot z \cdot m_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

よって本方式の制御系全体の量子化誤差 ΔE は、式(3)と式(4)の誤差を合成したものとして考えると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta E_h + \Delta E_w \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\Delta\phi_h \cdot g + \Delta\phi_w \cdot i \cdot z) m_n \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

本研究においては、この誤差 ΔE に対して、ピッチ円周上にて円周 $8 \mu\text{m}$ 以内を一つの基準として扱うことにした。したがって、主軸(ホブ軸)速度検出に用いるパルスエンコーダのパルス数 N_p を 2048 pulse/rev 、電気的内挿法により 8192 pulse/rev 、テーブル軸駆動モータの角度検出器(レゾルバ)のパルス数は、 10000 pulse/rev と選定した。

この主軸用パルスエンコーダより発生するパルス列を図2のブロック図に示すとおり NC 装置へ取り込み、テーブル軸の回転速度と位置を制御すればよい。パルス列の演算処理のための計算式は、式(6)、(7)で示されるものである。ホブ2分の1回転ごとにテーブル軸サーボ系に送出すべき指令パルスをテーブル回転パルス数ということにし、テーブル回転パルスを平歯車のとき F_s 、はすば歯車のとき F_h 、とすると、

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot 360 \cdot \frac{g}{z} \cdot \frac{1}{s} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_h = \frac{1}{2} \cdot 360 \left(1 \pm \frac{f}{z} \cdot \frac{\sin \beta}{\pi m_n} \right) \frac{g}{z} \cdot \frac{1}{s} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。式(7)における複号信号は、ホブのねじれ方向、歯車のねじれ方向、アキシャル送りの方向により定まるものである。また f は、アキシャル送り (mm/

rev)、 β は歯車のねじれ角度である。

さらに両式に用いている S は、NC 内部の計算単位のことを意味しており、単位は度である。NC 装置の演算速度の関係から、ワーク歯数とホブ条数の比 z/g (以下割出し値という)に応じて、この S 値を、 $0.01 \sim 0.001^\circ$ の範囲で選定した。すなわち、 S 値は制御方式が高精度加工を目指すものであるか、または、小割出し値の加工(能率を重視)をねらうかで区分した。表1に割出し値 z/g の大きさに応じた S 値の大きさを示す。

なお、式(6)、(7)とも、 S 値の設定けた内の単位で、 F_s 、 F_h が表現できない端数をもつ場合は、端数処理を行っており、歯幅全体にわたる歯すじ誤差は、非常に小さい。

3. 実 験

3.1 計測実験 式(6)、(7)を採用したホブ盤におけるテーブル軸の回転精度を確認する目的で計測実験をすすめた。図3に計測方法を示す。この計測はもっぱら式(6)、(7)の制御精度について評価するものであり、テーブル軸単独の動きをホブ軸の動きを基準にして調べるものである。

テーブル軸回転角度の計測には、ニコン製のロータ

表1 割出し値 Z/g と内部計算単位 S の値

No.	Index value Z/g	Value of minimum unit angle S	
		When accuracy is important	When efficiency is important
1	Above 45	0.001°	0.001°
2	23~44	0.002°	0.005°
3	9~22	0.005°	0.005°
4	6~8	(0.01°)	0.01°

図1 割出し系の駆動系統図

図2 割出し系の制御ブロック図

リエンコーダ USR 324 を用いた。この検出精度は、 $1s \pm 1s$ である。計測条件とその結果を表 2 に示す。

まず、内部計算単位を $0.01, 0.005, 0.001^\circ$ の 3 段階に区分し、つぎにテーブル 1 回転、すなわち 360° を割出し値で除したとき、それぞれの内部計算単位内で割切れる、割切れないの 2 条件で分けた。これらの代表値として、歯数 6, 7, 40, 44, 45 の平歯車および同 45 ののはずば歯車を選んだ。計測の結果は、以下のとおりである。

(1) 内部計算単位内で割り切れている場合は、いずれの条件でも良い位置決めデータが得られている。

(2) ホブ 1 回転当たりのデータの最大値と最小値の幅は、内部演算単位 S が 0.01° の場合は、 S 値の約 1.5 倍である。さらに S 値が 0.001° になると約 7 倍にまで比率として大きくなる。表 2 の範囲の項目のデータから判断して、テーブル軸の偏心 $5 \mu m$ の値、計測エンコーダの取付誤差の影響もあると思われる。

(3) 後述する数値計算、歯切り実験とも合わせて考えると、テーブル回転精度に関して、 S 値の影響は支配的であると判断できる。

3.2 歯切り実験 以上の結果を踏まえて、表 3 に示す条件により歯切り実験を行った。

加工結果を図 4 に示す。この加工精度は、JIS 3 級に合格しているが、仕上げアキシャル送り 1 mm/rev とは異なる送り目、約 3 mm/rev のマークが残っている。ここでは、擬似送り目と呼ぶ。このほか、歯すじ全体にうねりも認められる。

この解決方法の一つとして、アキシャル送り目の大きさを 0.4 mm/rev から 6 mm/rev に種々変化させてみた。アキシャル送りの大きさ 2 mm/rev の値を境にして、小さなアキシャル送り条件ならば、擬似送り

目が生じ、大きなその条件ならば、送り目が正しく出現することが分かった。図 8 にデータをまとめて示す。擬似送り目は負荷の小さい条件に限って生じることから、NC 側の要因と判断し、テーブル軸の回転精度に及ぼす内部計算単位の影響について調べることにした。

4. 数 値 計 算

本計算は、前述の式で計算されるデータに基づき、実際に歯車が創成される方法に従い、内部計算単位以下の端数の繰上りの状態を、図 5 の方法で求めるものである。対象とした割出し系の歯車列は、図 1 に示したものであるが、NC 装置の内部計算単位の因子に絞って検討するので、機械系の要因に関しては、既に

表 3 加工条件

Work data	Tool data	Cutting conditions
Module 6	O.D. 130mm	Hob rotary speed 100rpm
No. of teeth 23	I.D. 50mm	Cutting speed 40.8m/rev
Helix angle 20° (rt)	No. of threads 1	Axial feed: Rough 2mm/rev Finish 1mm/rev
Pres. angle 20°	No. of cutting edges 12	Cutting depth $13 \pm 0.5 \text{ mm}$
Material SCM415	Type Solid	Number of cuts 2 times
Hardness HB 180		Cutting method Climb cut method Conventional cut

図 3 テーブル軸の回転精度の計測ブロック図

表 2 テーブル軸の回転精度の一例

No.	Minimum unit angle S	Fraction	Equivalent gear conditions	Hob spindle output per revolution			
				Calculated value	Measured value		
					Range	Standard deviation	Contiguous error
1	0.01° (36")	No	Spur gear g=1 Z=6	pulse 216,000	$\pm 14''$	7.4	Max. value 22"
2		Yes	Spur gear g=1 Z=7	185,142.85	$\pm 26''$	12.5	48"
3	0.005° (18")	No	Spur gear g=1 Z=40	32,400	$\pm 11''$	5.3	11"
4		Yes	Spur gear g=1 Z=44	29,454.54	$\pm 15''$	8.8	22"
5	0.001° (3.6")	No	Spur gear g=1 Z=45	28,800	$\pm 13''$	6.5	15"
6		Yes	Hel. gear g=1 Z=45 $\beta=19.5^\circ$ m=3 f=1	28,777.32	$\pm 14''$	6.7	15"

図 4 NC ホブ切りの加工精度 (歯すじ誤差)

技術的に得られている数値を採用した。

4.1 内部計算単位の影響 計算条件は、表4に示すものであり、本研究で扱っている表3の歯車諸元を想定した。

計算結果の一例を図6に示す。上より順に図6(a) $S=0.005^\circ$ 、図6(b) 0.002° 、図6(c) 0.001° のデータである。横軸の長さは、歯車歯幅 25 mm に相当しており、横に送り幅によるピッチで目盛っている。左より2本めの縦の線は、第1回めのホブの中心位置を意味しており、この後ホブが右へ送られる。つまりコンペンショナルカットをシミュレーションしている。また、縦軸は歯すじ誤差である。以後同計算結果はすべて右歯面を想定したものである。

さて図6(a)の場合出力データは、ホブ切りが進む

表4 内部計算単位の影響を調べるための数値計算条件

Gear data	Purpose	Parameters
Module 6	To see influence of S value on 1 thread helical gear hob conditions	$f=1.0\text{mm/rev}$
No. of teeth 23		for:
Tooth width 25		$S = 0.001^\circ$
Helix angle 20		0.002°
		0.005°

図5 内部計算単位の影響を調べるための数値計算のフローチャート

につれて、ほぼ規則的に徐々に位相ずれを生じており、端数が切上がって正しい位置に戻るようになっていく様子がわかる。この現象が図6(a)に目立ち図6(b)図6(c)にあまり認められないのは、端数の切上げ単位が小さくなるからと考える。図6(a)は、図4の右歯面と良く一致していることもわかった。これらのデータから精度上の改善を検討するならば、S値は少なくとも、 0.002° 以下を選ぶことが必要であるといえる。

4.2 アキシャル送りの大きさとの関係 アキシャル送りの値を、 $f=0.2\text{mm/rev}$, 0.4, 1.0, 2.0, 3.6, 5.0, 6.0 の7とおりとして計算した。この結果を図7に示す。図7(a), (b), (c)…の順に送りを大きくしている。アキシャル送り 1mm/rev 以下では、擬似送り目が生じていることがわかった。

以上の結果を読み取り、グラフ化したものを図8に示す。図8には、歯切り実験の結果と、カット半径から求められる送り目深さの理論値、それに本数値計算による結果を合せて示した。歯切り実験の結果と数値計算結果とは良く一致している。さらに図8の結果から、送り目深さの大きさよりも内部計算単位S値によるピッチ円周上の深さが大きい条件までは、擬似送り目が生ずることがわかった。

4.3 歯すじ精度評価 本制御方式における歯すじ精度を評価するに当たり、本数値計算と、式(5)による評価方法の妥当性について確認するため、計算範囲を広げ、一条ホブの加工における種々の歯数(6~90枚)の歯車について、歯車すじ誤差に及ぼす内部計算単位の影響を調べた。結果を図9に示す。歯数以外の諸元は、表4と同じである。

以下に述べるのが、図9より判明した。

図6 内部計算単位の歯すじ誤差に及ぼす影響

(1) 歯数を一定にした場合は、内部計算単位を小さくするほど、歯すじ誤差は小さくなる。また、内部計算単位を一定にすると、歯すじ誤差は歯数にほぼ比例して大きくなる。

(2) 表1に示した割出し値と内部計算単位の値の設定値に合せて計算した結果を図9に太線で示した。この条件における JIS 1 級の歯すじ誤差の許容値 $8\ \mu\text{m}$ を、ほぼ満足している。

(3) 2章に示した量子化誤差の計算式、式(5)を用いた計算結果は、数値計算結果と、ほぼ傾向が一致している。しかし、小歯数では、式(5)の計算結果が、逆に大歯数では、数値計算結果がそれぞれ大きくなった。式(5)には、ホブ軸側の誤差が一定量として計算されているが、この値が小歯数の場合影響している。一方、マスタウォームや角度検出器の誤差は考慮していないことから、大歯数においては、小さく計算され

たものとする。

さらに多条ホブの条件として、表5に示す歯車を三条ホブで加工した場合についての数値計算を行なった。この結果を図10に示す。図10より、図10(a)の $S=0.005^\circ$ のときの歯すじ誤差は図10(b)の $S=0.002^\circ$ のそれに比べて、2.3倍悪化することがわかった。高能率加工のため、ホブの多条化がすすんでいる傾向であるので、 S 値を小さくすることが必要である。このための NC の対応策としては内部の処理速度の高速化が必要である。

5. 歯切り実験による確認

以上述べた検討内容を確認する目的で、実際の歯車を加工してみた。まず、表3に示した加工条件と同一の条件を選び、内部計算単位を、 0.002° に改善して実施した。結果を図11に示す。いま、歯すじ誤差にのみ着目すると、アキシャル送り 1 mm/rev の小さい値であっても擬似送り目は全くなく、うねりのみ残っていることがわかる。この歯幅全体にわたってうねっている要因としては、主にマスタウォームとホイールの

図7 送りの大きさと送り目の出現状態を求めた計算結果 (内部計算単位 $S=0.005^\circ$)

図8 送りの大きさと送り目の出現状態の関係 (内部計算単位 $S=0.005^\circ$ の場合)

図9 内部計算単位の歯すじ誤差に及ぼす影響 (NC ホブ切りにおける精度評価) (歯数以外の計算諸元は表4と同じ)

表 5 内部計算単位の影響を調べる数値計算条件

Gear data		Purpose	Parameters	
Module	3	To see influence of S value on 3 thread helical gear hob conditions	$f=1.0\text{mm/rev}$	
No. of teeth	29		for:	
Helix angle			19.5°	$S = 0.001^\circ$
				0.002°
			0.005°

図 10 内部計算単位の歯すじ誤差に及ぼす影響

かみあい誤差によるものが挙げられる。このことは、全歯の歯すじ誤差を計測し、さらに本研究の数値計算結果とをつき合せて判断することができた。図 11 の結果は、歯形誤差を除いて JIS 1 級に合格している。

さらに、表 5、図 10 に示した多条ホブによる歯切り実験を行い、JIS 3 級の精度が達成できた。

6. 結 言

NC ホブ盤の精度向上を目的として、ホブ軸とテーブル軸の角度検出器の定量化と、NC 内部のソフトウェア上の処理方法における問題点を明らかにし、以下の結論を得た。

(1) NC ホブ切りにおける加工精度は、NC 演算に用いる単位の大きさに最も大きく影響される。ホブが多条化すれば、割出し値が小さくなりホブ 1 回当たりのテーブル回転角度が大きくなることから、この影響度は、さらに増大する。

No.	Pitch Precision	Std. Value	Measured Value	
			Left tooth surface	Right tooth surface
1	Contiguous pitch error	$8\mu\text{m}$ (JIS Class 1)	$8\mu\text{m}$	$6\mu\text{m}$
2	Single pitch error	$8\mu\text{m}$ (JIS Class 1)	6.3	5.2
3	Accumulated pitch error	$32\mu\text{m}$ (JIS Class 1)	18.9	29.5
4	Tooth groove deviation	$22\mu\text{m}$ (JIS Class 1)	22	

図 11 高精度加工例 (内部計算単位 $S=0.002^\circ$)

(2) 次に影響する因子として、ホブ軸エンコーダ、テーブル軸の角度検出器の量子化誤差の大きさが挙げられる。

(3) 本研究において、1, 2 項の検討方法として、歯すじ誤差の数値計算を取り挙げた。このことより、実機における加工精度の改善を図ることができた。

本研究をすすめるに当たり、ご指導いただいた東北大学名誉教授 酒井高男先生、ならびに東北大学教授 江村超先生に心より厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 江村・酒井・島地, 機論, 51-465, C (昭 60), 10.
- (2) 上野, 機械設計, 28-10 (昭 59), 93.
- (3) 中井, 中部歯車懇話会「歯車における加工と計測の自動化シンポジウム」テキスト (昭 60), 10.
- (4) 野口・上野, 機講論, No. 810-4 (昭 56), 18.
- (5) 野口・上野, 機講論, No. 83-9 (昭 58), 89.

討 論

〔質問〕 柳 下 福 蔵 (沼津工業高等専門学校)

歯すじ誤差に現れる擬似送り目が数値制御装置内割出し系の内部計算単位に起因するものであることを明確にされ、その改善策を示されたことに敬意を表す。

(1) 歯すじ誤差については数値制御装置内割出し系の内部計算単位 (S 値) を小さくすることにより改善できることがわかったが、歯形誤差についてはどうか。

(2) 歯形修正して歯切りした場合の歯すじ誤差および歯形誤差に対する割出し端数および内部計算単位(S値)の影響はどのようなになるか。

〔回答〕 (1) 歯形誤差と歯すじ誤差の関係は、例えばはすば歯車の場合相互に影響し合うことが明らかである。したがって、歯すじ誤差の改善が図れると、歯形誤差の改善も可能であると判断している。ただし、歯形誤差には、ホブカッタそのものの影響を受けやすいので、本研究においては、定量的に扱っていない。

(2) 歯形修正して歯切りした場合の歯すじ誤差については、本研究の結論が適用できると考えている。また、歯形誤差に対する影響について、(1)と同じく定量化していないが、同様の考えを持っている。

〔質問〕 江 村 超〔東北大学工学部〕

(1) 図3の g/z の計算は、具体的にはどのような方法により行っているのか。また、プリンタには、いかなる物理量が印字されるのか。

(2) 図11のデータは良好な歯切り精度が得られることを示しているが、この実験に用いたホブの精度はどの程度か。

〔回答〕 (1) ホブ1回転に1個の信号を得るために、あらかじめ計算している g/z の値によりホブ軸側エンコーダパルスを分周した。

プリンタには、角度1s単位1パルスの出力をカウントした数値を印字させた。表示は、6けたを表示させている。

(2) ホブの精度は、JIS 0級である。

54巻504号, C編(昭63-8) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
春山 義夫 ほか	1862		図1	$2r_i$	$2r_0$
〃	1863	右	式(30)	$\hat{F}_t = \frac{d\hat{P}_t}{dR} + a \left\{ -j\sigma \left\{ \dots \right. \right.$	$\hat{F}_t = \frac{d\hat{P}_t}{dR} + a \left[-j\sigma \left\{ \dots \right. \right.$