超硬仕上げホブ切りに関する研究* (新形ホブ盤による歯車精度の向上)

米倉 將隆^{*1}, 杉本 武治^{*2}, 角 昌興^{*3}
熊谷 文男^{*3}, 永野 喜三郎^{*1}, 櫻木 功^{*1}

A Study on Finish Hobbing with Carbide Hob (Improvement of Gear Accuracy Using New Hobbing Machine)

Masataka YONEKURA, Takeji SUGIMOTO, Masaoki SUMI,
Fumio KUMAGAI, Kisaburo NAGANO and Isao SAKURAGI

This paper deals with the improvement of gear accuracy which has been obtained through the practical use of a newly developed hobbing machine. The carbide hob for finishing of large hardened gears has recently become very popular. A cutting edge with a rake angle of -30° degrees is fixed slantly to the cutting direction. The hob is characterized by its performance finishing only tooth surface of a gear without chipping of the cutting edge on a universal hobbing machine. However an accuracy of a gear with a higher hardness is poor. Especially, a tooth profile error appears largely. Therefore, the new CNC hobbing machine with the high rigidity and with the backlash elimination has been developed for large gears. From experimental results, the new machine was found to be effective in finishing of hardened gears.

Key Words: Gear, Cutting Tool, Accuracy, Generating Motion, Finish Hobbing, Carbide Hob

1. 緒 言

高硬度に焼入れされた中・大モジュール歯車の歯面を、超硬ホブにより低価格・高能率で仕上げする方法がある。このホブは相浦らにより発明され、超硬スカイピングホブと呼ばれ、一般のホブ盤上で歯車の焼入れひずみを除去することができる⁽¹⁾⁽²⁾。歯車を比較的高精度に仕上げることができるために、歯研等に替えてそのまま使用される。また、短時間で加工できるために、歯研の前加工用として急速に普及し、国内外の多くの歯切り工場で採用されている。国外での研究⁽³⁾⁽⁴⁾、被削歯車の運転試験も行われている⁽⁵⁾。

現在、スカイピングホブ切りに関する課題は、ホブの切れ刃の耐久性の増大と並んで歯車の仕上げ精度の向上である。これまで仕上げ精度の研究は、歯数の多い大径のものは、材料の準備や測定が実験上困難であったので、歯数の少ない場合についておもに解析されたきた⁽⁶⁾。その結果、歯形がピッチ点付近で凹み、歯すじの下部が飛び出すのは、ホブと歯車のかみあいに

おけるホブの左・右切れ刃の働きの不均衡が主原因とした。その一つの解決法として、従来のホブ盤のワークテーブルにブレーキをかけることにしたが、負荷のかけ方に難点があった。一方、テーブル径近くの歯数の多い場合については、より低精度となり、その原因をホブ盤の剛性からとしていた。したがって、これらを解決する新形ホブ盤の開発が待望されてきた。

本研究では、スカイピングホブ切りのままで使用することを目的として、高硬度歯車を JIS 1 級以内に加工できるようにした。そのために、ホブ盤の伝達誤差測定、振動測定、歯形の機上測定などを取り入れて実験により調べた。従来のはん用ホブ盤における仕上げ精度の問題点を検討し、それをベースにして新たに開発した新形ホブ盤において、改良できたので報告する。

2. 実験ホブ盤と実験方法

実験に用いたホブ盤は、従来から剛性が高いとして評価のある直径 1 000 mm まで切削できる歯車伝達方式の A ホブ盤と、新たに CNC 機として開発された B ホブ盤である。両ホブ盤の伝導系統を図 1 に示す。A ホブ盤はホブと被削歯車間が、これらの中間に介在する多くの歯車、軸、軸受などに影響される。それに対して、新形の B ホブ盤はホブと被削歯車間が歯車など

* 原稿受付 1996 年 1 月 18 日。

^{*1} 正員、久留米工業高等専門学校 (〒830 久留米市小森野町 1232)。

^{*2} 正員、久留米工業大学 (〒830 久留米市上津町 2228 66-1)。

^{*3} 正員、カシフジ (〒601 京都市南区上鳥羽鴨田 28)。

(a) A hobbing machine

(b) B hobbing machine

Fig. 1 Transmission systems of test hobbing Machines

で連結されていない。ホブ軸テーブルはそれぞれ別のモータで駆動される。B ホブ盤は、A ホブ盤に比し各部の剛性を強めるために重量を 75% 増していること、マスタウォームホイール径を大きくしていること、さらにホイールにバックラッシュ・エリミネータ (以下 B. E. と呼ぶ) を付けていることが特長である。

B ホブ盤において、試験歯車をホブ切りしているときの様子を図 2 に示す。被削歯車の精度を考察するために歯形、歯すじ以外に、ホブ軸から 1 段前の軸とワークサポート上にそれぞれエンコーダを取付け、ホブと被削歯車間の角度伝達誤差を測定した。また、歯車材の円周方向 V1、半径方向 V2 およびホブヘッドのホブ軸方向 V3 の振動値も示した。下図は B. E. でマスタウォームの片側を固定し、他方にブレーキ油圧を利用して負荷をかける構造である。

実験に使用した超硬スカイピングホブ、歯車および切削条件を表 1 に示す。従来の研究との関連から試験歯車はモジュール 8 とした。前加工ホブ切り後に、A 歯車および B 歯車は浸炭焼入れ、C 歯車は歯面歯底一歯移動方式による高周波焼入れを行った。切削は歯車の歯面のみをスカイピングホブで微量切込みにて仕上げる。一般にスカイピングホブ切りのままの歯面を使用するときは歯切精度、送り目の深さなどを考慮し、送りは 2 mm/rev 以下、切込みはひずみ量から 0.2~0.6 mm 程度である。

Table 1 Test hob, gears, hobbing machines and cutting conditions

Skiving hob		Gears		
Module	m=8	No. of teeth	A	B
Pressure angle	$\alpha=20^\circ$	Helix angle β	18	84
Outside dia.	D=150	Face width	0°	0°
Tilt angle (rake angle)	RA=30°	Hardness HRC	60	62
Cutting gash	NT=12	Material	SCM420	SCM415
No. of thread	1 $\frac{1}{2}$ RH			S45C
Cutting conditions				
Hobbing machine	A(KR-1000), B(KL-1000 CNC)			
Cutting speed	V=75m/min			
Axial feed of hob	f=2mm/rev			
Cutting depth	t=0.35mm			
Cutting direction	(in the direction of tooth bottom)			
	Conventional hobbing, dry

Fig. 2 Photograph of the B hobbing machine

Fig. 3 Accuracy of the hob

ホブの精度は振れ、切れ刃面、歯すじ、歯形の各項目について JIS で規定されている。使用したホブの精度を図 3 に示す。JIS 0 級でホブ歯形がすでに 14 μ m なので、歯車の JIS 0 級の 8 μ m を切削することは難しいので、ホブは JIS 0 級の 1/2 以内に入るように丁寧に仕上げている。一般のホブ盤で切削するとき、ピ

ッチ点付近が凹む経験から、歯車の歯形形状を中凸とするために、ホブ歯形は中凹にしている。

3. 実験結果および考察

3・1 小歯車の仕上げ 歯車の精度は一般に歯形、歯すじ、ピッチなどを測定し判定する。その中でも歯形の狂いは重視されている。まずは用ホブ盤のAホブ盤を用いて、高硬度に焼入れしたA歯車を、ホブの取付に細心の注意をはらいながら、表1に示した切削条件でスカイピングホブ切したときの歯すじおよび歯形を測定し、歯溝から表し図4に示す。歯先部、ピッチ点付近および歯元部の3箇所歯すじを測定すると、ピッチ点付近の歯すじの下端部で左歯面で10 μm 、右歯面で4 μm が飛び出たようになっている。ピッチ点付近の歯形を測定すると、切削途中①では左歯面で16 μm 、右歯面で14 μm の中凹みが生じ、左歯面の中凹みがより大きく現れた⁽⁶⁾。抜け終わり②では中凹み

がわずかししか現れず正しい歯形に近い形状になっている。従来のホブ盤において、歯数の少ない高硬度歯車をスカイピングホブ切するとき、歯形は切削途中と抜け終りで異なった。したがって、以下の実験結果には①と②の歯形を示し考察していくことにする。

このときのホブ各切れ刃の働きを調べるために、切削に参加した切れ刃のすくい面上の痕跡を切削後に実測して図5に黒色で示した。歯車軸とホブ軸が直交する線上に歯車の歯溝の中心がきたときに、その位置で歯車の歯面を切削する切れ刃の刃部を0番刃とした。0番刃からホブの回転方向にプラス、逆方向にマイナスの番号を順に付けた。12番刃、0番刃および12番刃がホブ軸方向の同じ刃部列にある(以下、0番刃部列と呼ぶ)。A歯車の歯数が少ないので、切削に参加した切れ刃数は少ない。歯車が0番刃部列によって削られるとき、左：右の切れ刃は2：2で働いており均衡状態にある。それに対して、3番刃部列では左：右の切れ刃が2：1で、あるいは3番刃部列では左：右の切れ刃が1：2で働いており不均衡状態にある。切削時に歯車の片歯面の歯先と歯元を2刃が反対歯面のピッチ点近くを1刃が削ることになる。図4①の歯形に中凹みはこの影響であると考えられる。

さらに、側面切れ刃にかかる切削力を知るために切削トルクとスラスト力について調べた。切削力の測定は、ホブアーバに貼ったひずみゲージを用いて、スリップリングを介して検出した⁽⁷⁾。図6上図は図4の切削条件において仕上げたときの切削トルクおよびスラスト力線図で、ホブ1回転について示したものである。下図はそれを拡大したものである。切削トルクでは各切れ刃が働くときに凸部で刃部列数の12山現れ、働いていないときに平坦部で、一般のホブ切りに比較して切れ刃が働いていない期間が長い。各刃部列にかかる切削力は、各切削トルクをホブ半径で除した値で、最大切削力は0.7 kNであった。スラスト力をみるとホブが切削時に左右に動き、それぞれの刃部列の形状が異なっている。最大スラスト力は0.47 kNであっ

Fig. 4 Tooth profile and lead errors of the gear (A machine, A gear, $I=3.2\text{ m}$)

Fig. 5 Cutting traces of cutting edges (A machine, A gear, $I=3.2\text{ m}$)

Fig. 6 Cutting forces in finishing (A machine, A gear, $I=3.2\text{ m}$)

た。

次にBホブ盤を用いて歯車精度の向上をはかることにした。Bホブ盤はAホブ盤に比較してホブ軸まわりを含めたホブとテーブル、サポートを含めた歯車材との関係に重点をおき、NC化したものである。図4と同じ切削条件で、B.E.を用いて歯面のみを仕上げたときの歯形と歯すじを図7に示す。切削中の変動をホブ盤の各部に取付けた測定機器類でチェックした。歯形誤差 $5\mu\text{m}$ 、歯すじ方向誤差 $2\mu\text{m}$ となりJIS0級以内である。図4に比べて歯すじの終端での飛び出し量が、 $8\mu\text{m}$ 減少した。切削途中①におけるピッチ点付近の歯形の凹みもなく切削途中と抜け終わりの形状は、ほぼ同じになった。精度向上にホブ軸回り、伝導系統およびB.E.などが大きく寄与したと考えられる。

3・2 大歯車の仕上げ 次に歯数の多いときの歯車精度について検討した。Aホブ盤において、表1に示した切削条件でB歯車を仕上げたときの歯形、歯すじを図8に示す。ピッチ点で測定した左歯面の歯すじ

Fig. 7 Tooth profile and lead errors of the gear (B machine, A gear, $I=3.2\text{ m}$)

Fig. 8 Tooth profile and lead errors of the gear (A machine, B gear, $I=5.1\text{ m}$)

の抜けがけが $7\mu\text{m}$ 飛び出したようになっている。飛び出し量は歯数の少ないときに比べて小さい。歯形は一つの歯面の中央①、下側から 1 mm の②、下側から 4 mm の③で測定した。切削途中①と抜け終わり②の歯形が少歯数のときと同じように異なって現れた。抜けがけの②の歯形はホブの歯形に応じて中凸みになっているが①の歯形に中凹みが現れた。また、③では歯先、ピッチ点近く、歯元でより凹み、それらの中間で二つ凸に明確になっている。1個の切削長が長いので、③ではホブ切れ刃の摩耗が大きくなり、その影響を受け①の歯形と異なると考えられる。

各切れ刃の働きを調べるために切削に参加した切れ刃を実測し図9に示した。図5に比べて歯車の歯数が多いので、一つの刃部列における参加切れ刃数も多くなった。6番刃部列および7番刃部列によって削られるとき、左：右の切れ刃は2：2で働いており均衡状態にある。それに対して1番刃部列などでは左：右の切れ刃が3：2で、あるいは1番刃部列では左：右の切れ刃が2：3で働いており不均衡状態にある。図8の①の歯形に中凹みが現れているのは、この不均衡状態が影響しているが、2：1の切れ刃の不均衡状態がないために図4に比べて少なくなったと考えられる。

図10上図は図8の切削条件において仕上げたときの切削トルクおよびスラスト力線図である。下図はそれを拡大したものである。切削トルク線図では、図6

Fig. 9 Cutting traces of cutting edges (A machine, B gear, $I=5.1\text{ m}$)

Fig. 10 Cutting forces in finishing (A machine, B gear, $I=5.1\text{ m}$)

に比べて無負荷時にも微動しており、絶えずホブ軸が動いているようである。切込み始めは、拡大図で明らかのように、食い込み角度は小さく、かつ二段になっている。最大切削トルクは小歯車のときに比べて1.6倍になった。スラスト力をみると、小歯車のときに比べてホブが左右により動き、それぞれの刃部列の形状がかなり異なっている。いかに正しく取付けたとしても、大径であるので不安定な切削になる。

従来、スカイピングホブは歯切精度を維持するためとホブが高価なので、できるだけ早めに再研削するようにすすめ、0.1 mmを限界としてきた。図8の条件で切削したときのホブ切れ刃の摩耗を測定し図11に示す。図5に示す0番刃を中心として切削に参加する切れ刃は±16番である。最大摩耗量は0.1 mmであった。本実験は測定の都合により、ドライで切削したが、ホブの耐久力を増すためには、スカイピングホブ切り専用の切削油を注ぐと、摩耗はかなり減少する⁽²⁾。1個の切削長が長いので、切れ刃の摩耗が進行するとき、図8のように歯形が変化することになる。

ホブ軸とワークテーブル間の伝達誤差を調べること

Fig. 11 Max. Wears of each cutting edges
(A machine, B gear, $I=5.1$ m)

V1	V2	V3	Amplitude of vibration unit: μ m
19	7	6.5	

V1: Circumference direction of work piece
V2: Radial direction of work piece
V3: Y direction of hob shift slide

Fig. 12 Transmission deviation and vibration
(A machine, B gear, $I=5.1$ m)

により、ホブ盤の創成運動が正しく行われているかを知ることができる。それは歯車精度に及ぼす影響が特に大きいと考えられる。そこで、図12に図8の切削のときにおけるホブ盤の伝達誤差と各部の振動を、それぞれに取付けた測定機器類でチェックした結果を示す。伝達誤差は歯車のピッチ円周上(672 mm)の距離に換算し、歯車の切削時の振動は径562 mmの位置で測定した。ホブ1回転当たりの最大伝達誤差22 μ m、歯車円周方向の最大振幅19 μ mであった。伝達誤差、振動の波形ともに、切削量の負担の違いによりホブ切れ刃溝ごとに違いが現れている。

Bホブ盤は小歯車よりもむしろ大歯車を切削するのに多く使用される。一般のホブ盤でテーブル径近くの歯車を切削するとき振動が大きく、かつ歯切精度も悪い。そこで、B.E.にかけるブレーキ油圧を $P=1.5$ MPa(歯車の歯面上で $F=20.6$ kN相当)として、図8と同じ切削条件を用いて、仕上げたときの歯形と歯すじを図13に示す。歯すじは抜けがけの②の下側の飛出しもなくなった。送りマークも規則正しく入り、図8に比して歯形精度は6 μ m向上した。①と②の歯形は2 μ m程度のわずかな違いで、左・右の切れ刃の不均衡状態による凹凸も生じていない。下から4 mmの歯形精度も①の歯形と同程度になった。ホブ摩耗の影響も少ないようである。B.E.の効果が顕著であったと考えられる。これにより、歯形精度は、JIS 1級以内となった。

図14にそのときの伝達誤差と各部の振動を測定した結果を示す。図14(a)の伝達誤差は、最大6 μ mとなり、Aホブ盤に比べて16 μ mと大きく低減された。図14(b)の歯車円周方向の最大振幅は7 μ mとなり、同じく12 μ m低減された。他の箇所の振幅も低減され、安定して切削ができるようになった。振動の波形は切削力を測定するときの線図に近似しており、ホブ

Fig. 13 Tooth profile and lead errors of the gear
(B machine, B gear, $I=5.1$ m)

V1	V2	V3	Amplitude of vibration unit: μm
7	4.5	2.2	

Fig. 14 Transmission deviation and vibration
(B machine, B gear, $I=5.1$ m)

Fig. 15 Tooth profile errors of the gear and
transmission deviation
(A machine, C gear, $I=5.1$ m)

の刃部列数 12 に対応した凹凸がはっきりと現れている。これらの結果より、B ホブ盤は歯数の大小にかかわらず従来のホブ盤に比べて歯切精度を向上できることがわかった。

3・3 歯面硬度にむらのあるときの仕上げ 浸炭焼入れおよび高周波焼入れにおいて、発生するひずみは一定していないので精度管理が難しい。特に、高周波焼入れにおいて、たびたびクレームが現場で起こっている。そこで現在、もっとも利用されている歯面歯底移動の 1 歯飛び焼入れした歯車における傾向を調べてみた。B 歯車と同一寸法で、S 45 C 材のブランクを高周波焼入れし C 歯車とした。歯先とピッチ点をショアー硬度で測定し、任意の連続した(a), (b)および(c)

Fig. 16 Tooth profile errors of the gear and
transmission deviation
(B machine, C gear, $I=5.1$ m)

歯の硬度を図 15 の右上図に示す。1 歯飛びに歯溝で硬さが異なり、歯面硬度にむらを生じた。焼入れのままで使用するとすると運転に支障をきたすことになる、ぜひこのような歯車は歯面仕上げを行いたい。C 歯車を A ホブ盤で図 8 と同じ切削条件で黒皮から 1 回で仕上げた。任意の連続した隣の歯溝のピッチ点付近における歯形を測定し、切削途中①を実線で、抜け終わり②を破線で図 15 左図に示す。そのときの伝達誤差を下図に示す。隣の歯溝の歯形は比較的大きく異なっており、伝達誤差も隣の歯溝を切削するとき異なっており、1 歯ごとに変動が現れている。仕上げ削り後の歯形がこれでは、歯車を回転させたとき、騒音が発生することが予測される。

このように A ホブ盤では、切削が難しい歯車を B ホブ盤を使用することで歯形精度の向上がみられるかを検討した。C 歯車を図 15 と同じ条件で切削したときの歯形と伝達誤差を図 16 に示した。隣の歯と硬度差があるにもかかわらず、隣との歯形形状の違いも少なくなり精度の向上がみられた。伝達誤差は小さくなり、1 歯ごとの変動もなくなった。B. E. を含む新形ホブ盤の性能向上が効果を発揮したと考えられる。

4. 結 言

高硬度に焼入れされた大型歯車の仕上げ精度向上を目的として、m8 の超硬仕上げホブを用いて、従来の一般ホブ盤と新ホブ盤を比較して実験を行った結果、歯形誤差を JIS 1 級以内に実現することができ、以下のようなことがわかった。

(1) 従来の伝導系統を有するホブ盤に比べて、新

たに開発した NC ホブ盤は、精度、剛性の改良およびバックラッシュ・エリミネータの効果などにより、小歯車の仕上げにおいてホブ切れ刃の働きなどから生じる歯形誤差を向上させることができた。

(2) 新形ホブ盤により、大歯車の仕上げにおいてホブ盤の伝達誤差を少なくし、振動も減少させることができ、歯形誤差を向上させることができた。

(3) 新形ホブ盤により、焼入れにより生じた隣の歯溝間の歯形誤差および硬度差がある場合でも、歯形を同一形状に仕上げることができた。

最後に実験に協力していただいたアヅミ(株)、住友電工(株)に謝意を表する。

文 献

- (1) 相浦正人・ほか2名, 機講論, No. 730-10(1973), 55-61.
- (2) Ainoura, M. and Yonekura, M., *Proceedings of 1st World Congress on Gearing, Paris*, Vol. 1(1977), 1099-1113.
- (3) Schmidhammer, A., *Proceedings of 2nd World Congress on Gearing*, Vol. 2(1986), 553-561.
- (4) Yu, M., G., *Proceedings of International Conference on Gearing*, Vol. 1(1988), 269-274.
- (5) 中西勉, 機 P-SC 206 分科会, 報告書, (1994) 147-151.
- (6) 相浦正人・米倉將隆・永野喜三郎, 機論, 48-432, C (1982), 1235-1244.
- (7) 相浦正人・ほか2名, 機講論, No. 72-4(1972), 17-20.