高減速比フェースギヤに関する研究*
(第2報, ギヤの歯切り)大島 史洋^{*1}, 吉野 英弘^{*1}, 永田 英理^{*2}A Study on High Reduction Face Gears
(2nd Report, Cutting of Face Gear)Fumihiko OHSHIMA^{*3}, Hidehiro YOSHINO and Eiri NAGATA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Saga University,
1 Honjo-machi, Saga-shi, Saga, 840-8502 Japan

This paper describes a hobbing method for a face gear meshing with a large helix pinion with a small number of teeth. Due to small numbers of hob teeth and cutting edges, it is known that interference on hob tooth flanks is apt to occur, and also profile errors are produced. In this paper, to avoid this interference a new hobbing method is proposed. In the method, cutting is carried out in a cycle which consists of four steps during one rotation of the hob. (1) The hob is fed to the gear blank, (2) rotated for gear cutting, (3) kept away from the blank, (4) returned to the initial position and a little rotation of the blank is given for the next cycle. The face gear is finished by repeating the cycle until the gear blank makes one rotation. To realize the proposed method, an NC gear-cutting machine with four control axes is designed and made. Meshing tests using the face gears finished on the gear cutting machine are conducted. As the results, smoothly meshing and good contact patterns are obtained.

Key Words: Gear, Face Gear, Hobbing, Gear Cutting Machine, Interference, High Reduction Ratio

1. 緒 言

本研究では, ウォーム状のピニオンをもつフェースギヤに着目し, 安価で効率の高い歯車減速機の開発を目指している. 前報⁽¹⁾では, フェースギヤのかみ合い解析に要素除去法を適用して, ギヤ歯面の全容を示すかみ合い状態図を作成し, ギヤ歯面の創成過程において生じる歯先尖りと二種類の干渉を考慮した有効歯幅の決定方法を示した.

フェースギヤは, 円筒歯車であるピニオンとそのピニオンと共役な歯面をもつギヤによって構成される. ピニオンは, 円筒歯車に対する通常の加工方法がそのまま利用できるが, ギヤの加工はフェースギヤが普及していないこともあって専用の歯切り機械は市販されておらず, 一般にはギヤシェーパにアタッチメントを取り付けて行われている⁽²⁾. しかし, 本研究の場合のように, ピニオンが小歯数・高ねじれとなる場合は, カッタが細長い形状となるため, 加工精度や加工能力を確保することは極めて困難である. ピニオンを小歯

数・高ねじれとするフェースギヤをホブ切り⁽³⁾によって加工する試みも行われているが, 加工において問題となる多角形誤差や工具二番面(逃げ面)の干渉について詳細な研究は行われていない.

本報では, ホブを用いて高減速比用フェースギヤを歯切りする場合の問題点を整理し, 多角形誤差や工具二番面の干渉を考慮した新しい加工方法を提案する. また, 提案した方法による加工結果, 加工したギヤを用いて製作した高減速比フェースギヤのかみ合い試験結果などについて述べる.

2. ホブによるフェースギヤの歯切り

2・1 従来の方法 図1は, 高減速比用フェースギヤをホブによって仕上げる場合のホブとワークの位置関係を示す. ホブ軸とワーク軸は直交関係にあり, オフセットが与えられている. ホブは, ワークに対してピニオンとギヤの回転比による創成運動の下で切り込みと送りが与えられ, 歯切りが行われる. 切り込みと送りの与え方には, 以下に示す二種類が考えられる.

一つは, 図1(a)のようにホブをワークの歯幅と向かい合わせ, ワークに対してホブの半径方向に切り込みと送りを与える方法である(以下, インフィードホブ切り). ギヤの歯幅全体を同時に加工できるが, 本研

* 原稿受付 2008年8月21日.

^{*1} 正員, 佐賀大学理工学部(☎840-8502 佐賀市本庄町1).^{*2} アイシン精機(株)生技開発部(☎448-8650 刈谷市朝日町2-1).

E-mail: oshima@me.saga-u.ac.jp

Fig. 1 Cutting of face gear with hob

Fig. 2 Coordinate system for analyzing cutting condition

究の場合のようにホブが細くなる場合は、剛性不足による精度低下や、切れ刃溝数が多くとれないことによる多角形誤差、工具二番面の干渉が発生する。もう一つは、図 1(b)に示すように、ホブをワークの外側に配置し、予めホブをワークに対して切り込んでおき、その後、ホブを軸方向に移動させて歯切りを行う方法である（以下、タンジェンシャルホブ切り）。この場合、ホブ軸端の切れ刃のみが切削に参加する。また、ホブの軸方向送りに合わせて、創成運動に補正を与える必要がある。いずれの場合も、切削は創成運動による歯すじ方向の相対すべりによって行なわれ、切削がカッタの軸方向移動によって行なわれるギヤシェーパの場合とは異なる。このほか、上記の二つの方法を併用することも考えられる。

2・2 計算方法 ホブ切りにおいて発生する多角形誤差やホブ二番面とワークの干渉状態を調べるためには、ホブの各切れ刃によるワークの切削状態を正確に把握する必要がある。図 2 は、本研究の計算に用いた座標軸系を示す。いま、ワークと回転中心を同じと

Table 1 Dimensions of test face gears

Items		Gear pair A	Gear pair B
Pinion/hob			
Module (mm)	m	2	2
Pressure angle (deg.)	α	20°	20°
Number of teeth	z_1	1	3
Helix angle (deg.)	β	83.671°	70.687°
Pitch circle radius (mm)	r_1	9.071	9.071
Tip relief angle (deg.)	ε	8°	8°
Number of gash	N_g	6	6 (12)
Gear			
Number of teeth	z_2	27	33
Offset (mm)	a	24	24
Inner radius (mm)	r_{in}	38	38
Outer radius (mm)	r_{out}	58	58

Fig. 3 Hob cutting edge after regrinding

する半径が R で、ワークとともに回転する薄肉円筒を考える。また、薄肉円筒とホブ軸との交点 C からの距離 ξ を用いて切削に参加するホブ切れ刃の位置を表す。ホブの切れ刃輪郭は、三次元の空間曲線となり、ホブの軸断面歯形、切れ刃溝ねじれ角およびすくい角から求まる⁽⁴⁾。ホブとワーク間の創成運動によって薄肉円筒上に表れる一連の切れ刃 ($\cdots$, No.-1, No.0, No.+1, $\cdots$) の軌跡の包絡線がホブ切り歯形となる⁽⁵⁾。本研究では、切れ刃の通過前後のホブ切り歯形を比較することにより、多角形誤差や二番面の干渉状態を調べる。この値を適当に組み合わせることによって、切削に参加する切れ刃の数や範囲、また、ホブとワークの歯数比の影響を考慮することができる。これを小さな間隔で変化させれば、多角形誤差の小さいホブ切り歯形（理論歯形）を得ることができる。

2・3 二番面の干渉 ホブ二番面とワークの干渉を調べるには、まずホブ二番面の形状を知らなければならない。本研究では、図 3 に示すようにホブのすくい面を ζ だけ研ぎ直した場合の切れ刃輪郭を、予めホブの二番取り研削に用いた砥石の形状と二番取り条件から求めておき、ホブ二番面を表す「二番面切れ刃」として用いた⁽⁴⁾。ホブの i 番切れ刃の二番面（逃げ面）が半径 R の薄肉円筒上においてワークと干渉するかどうかは、以下のように判断できる。まず、半径 R の薄肉円筒について i 番目までの切れ刃が通過した後のホブ切り歯形（ i 番ホブ切り歯形）を求めておく。つぎに、薄肉円筒に対して i 番刃の二番面を表す「二番面切れ

Fig.4 Paths of cutting edges in infed hobbing (Gear pair A, R=48mm)

Fig.5 Paths of cutting edges in infed hobbing (Gear pair B, R=48mm)

刃」を作用させ、その軌跡 (i 番二番面切れ刃軌跡) を i 番ホブ切り歯形に重ねて描く。干渉有無の判断は、 i 番二番面切れ刃軌跡が i 番ホブ切り歯形に食い込んでいるかどうかによって行う。食い込みがある場合は干渉が発生し、なければ干渉は発生しない。この計算は、フェースギヤの歯幅内で薄肉円筒の半径 R および研ぎ直し角 ζ を変化させ、すべての切れ刃について行う必要があり、計算量は膨大なものとなる。

3. 計算結果

3・1 インフィードホブ切りの場合 表1に、本研究で用いたフェースギヤの諸元などを示す。図4は、ピニオンの歯数が $z_1=1$ の場合のフェースギヤをインフィードホブ切りで仕上げる場合の計算結果を示す (表1の歯車対 A, $R=48\text{mm}$)。切れ刃溝数は $N_g=6$ とした。創成運動によって各切れ刃および各二番面切れ刃が薄肉円筒上に描く軌跡をそれぞれ実線および破線で示している。二番面切れ刃は、研ぎ直し角を $\zeta=10^\circ$ として計算した。これは、使用したホブのすくい面研ぎ直し量に換算すると $\delta=1.58\text{mm}$ に相当する。図4からわかるように、4番刃から4番刃までが歯切りに参加している。4番刃において、破線が実線から飛び出している部分が存在し、干渉発生が疑われるが、インフィードホブ

切りでは、ホブを半径方向に徐々に切り込むために、この部分は切込みが小さい時点で別の切れ刃 (図4の -1, 0, ..., 4 番刃) によってすでに除去されており、この部分でホブ二番面とワークが干渉することはない。すなわち、図4を下側から見て、各切れ刃において実線が破線より手前にある場合、干渉は生じない。他のギヤ半径についても計算を行ったが、 $z_1=1$ の場合において干渉が発生することはない。

図5は、ピニオンの歯数が $z_1=3$ の場合である (表1の歯車対 B, $R=48\text{mm}$)。ホブ条数の増加により切削に参加する切れ刃が減少し、図4に比べて大きな多角形誤差が表れている。また、白矢印付近においてホブ二番面とワークの干渉が発生している (図5を下側から見たとき、実線より破線が手前に表れている)。このように、二番面干渉は多角形誤差が大きい場合に発生する。したがって、ホブの切れ刃溝数を増加させれば、二番面干渉は発生しにくくなる。研ぎ直し角を変化させた計算も行ったが、ほぼ同じ位置で同様の干渉が発生した。

3・2 タンジェンシャルホブ切りの場合 図6は、表1に示す歯車対 B のフェースギヤをタンジェンシャルホブ切りで仕上げる場合のホブ切り歯形の変化を示す。ギヤの歯幅をホブ軸端の切れ刃のみで仕上げるため、多くの加工時間を要し、また工具寿命も短くなる。計算は、図1(b)に示す正方向の創成運動に対して、逆方向の創成運動を与えた場合についても行った。ただし、逆方向の創成運動を与える場合は、ホブ切れ刃の向きを逆にした。

タンジェンシャル送りは、ホブの切れ刃溝数を増加させるのと同じ効果がある。図6においては、ホブの切れ刃溝数を $N_g=12$ とした場合に相当するタンジェンシャル送りを与えた。このとき、軸方向の切れ刃間隔 $\Delta\zeta$ は、ホブのリード $L_h=19.973\text{mm}$ を切れ刃溝数で割った 1.664mm となる。歯切りは、図6の左から右に向かって進行する。正方向の創成運動を与えた場合は、二番面とワークの干渉は発生していないが、逆方向の創成運動を与えた場合は、白矢印部で干渉の発生が見られる。二番面の干渉発生の様子は、与える創成運動の方向によって大きく異なる。

図7は、逆方向の創成運動を与えて二番面干渉が発生した場合の歯形の仕上がり部付近 (図6(b)に○印で示す) の拡大図を示す。図7からわかるように、歯形の仕上がり部付近では、破線は常に実線よりも後退しており、二番面干渉は発生していない。このことは、切り込みと送りを小さくしさえすれば、創成運動の方向に関係なく、二番面干渉は生じないことを意味する。

Fig. 6 Changes in hobbed tooth profiles by direction of generating motion in tangential hobbing (Gear pair B, $R=48\text{mm}$, $\Delta\xi=1.664\text{mm}$)

Fig. 7 Enlargement near required profile

Fig. 8 Cutting of face gear by new proposed method

ただし、切込みと送りを小さくする分、加工能率は低下する。

以上に示したように、高減速比用フェースギヤのホブ切りにおいては、多角形誤差や二番面干渉が生じやすく、これらを防止するためには、歯切り条件を変化させて複雑な計算を行い、最適な歯切り条件を見いだす必要があるほか、加工能率や工具寿命も大きく制限

を受けることが明らかになった。そこで、本研究では、このような問題の生じない高減速比用フェースギヤのための新しいホブ切り法を提案する。

4. 提案する歯切り法

4・1 加工原理 図8に、本研究で提案するフェースギヤのホブ切りにおけるホブとワークの位置関係を示す。ホブとワークの関係位置は、図1(a)と同じであるが、各軸に与える運動が異なる。切削は、ホブをねじ筋に沿ってねじ運動させ、カッタ軸が約半回転する間に行う。その間、創成運動は与えず、ワークは固定されている。

図9に、ホブ軸が一回転する間のホブとワークの関係を示す。歯切りは、①近寄り工程、②切削工程、③遠のき工程、④戻り工程の4工程からなる⁶⁾。ワーク1回転を送りの回転角で分割した回数だけ、4工程を繰り返すことにより歯切りが完了する。各工程の開始位置を鎖線、終了位置を実線で示す。

近寄り工程ではホブは初期位置からねじ運動をしながら、切り込みが所定の値になるまで水平方向に移動する。切削工程では、ホブのねじ運動によって切れ刃とワークの接触部分が切削によって除去される。遠のき工程では、ホブはねじ運動をしながら水平方向に後退し、切れ刃はワークから引き離される。戻り工程では、ホブは初期位置に戻され(回転と軸方向移動)、さらにつぎの切削に備え、ホブとギヤの歯数比に基づ

Fig. 9 Cutting processes for new proposed method

Fig. 10 Paths of cutting edges in proposed hobbing (Gear pair B, $R=48\text{mm}$)

く創成運動として送りを与えられる。この場合、送りによって基準切れ刃の軸方向位置が初期位置から徐々にずれるため、時折、ホブに対して軸方向位置の補正を行う必要がある。なお、図9に示す送りの方向は、上向き削りの場合である。送りを小さくすれば、切り屑は薄くなり、多角形誤差は減少する。なお、図9は、提案するホブ切りの定常状態におけるホブとワークの運動を表している。切削開始時においては、図9の運動を与えながら、ホブをワークに対して徐々に切り込む運動を与える必要がある。

図10は、提案するホブ切りにおける代表的切れ刃の二番面干渉状態を示す。創成運動を与える工程と切削工程が完全に分離しているため、当然ながら二番面が干渉することはない。したがって、ねじタップの場合と同様に、二番なしのホブも使用可能である。

4・2 歯切り装置 提案する歯切り法を実現するには、オフセットの設定を含め、5軸制御の歯切り装置が必要になる。本研究では、オフセットは手動で与

Fig. 11 Trial-made gear cutting machine

Fig. 12 Cutting of face gear

えることとし、4軸制御の歯切り装置を製作した。

図11に、試作した歯切り装置を示す。カタヘッドとワークヘッドは、同じ構造とし、それぞれを直線軸と回転軸の2軸制御とした。直線軸は、二本のリニアガイドとボールねじ、回転軸の割り出しには、減速比が1/72の複リードウォームギヤを用いた。両ヘッドは、それぞれの主軸が互いに直角になるように定盤の上に取り付け、オフセットはワークヘッドの下部にスペーサを敷くことによって与えた。

制御装置は、市販のパソコンNCを使用した。セミクローズド方式の同時4軸制御のもので、命令はGコードによって与えることができる。最小制御単位は、直線軸で0.001mm、回転軸で0.001°である。また、本研究の目的である高減速比フェースギヤの歯切りを行うには、細長いホブを使用する必要があるため、カタヘッドにセンタサポートを取り付け、カタのたわみによる精度低下を防止した。

Fig. 13 Contact patterns of test face gears ($z_1/z_2=3/32$)

Fig. 14 Measured transmission errors

5. 実験結果

5・1 歯切り試験 図12に、製作した歯切り装置による歯切りの様子を示す。歯切りに用いたギヤはS45C製で、歯数が32、ホブの切れ刃溝数が3であることを除き、表1の歯車対Bのものと同一である。また、切れ刃の向きが逆のホブを使用したため、図8、9の場合とねじ運動と創成運動の方向が逆になっている。切り込みは、全切り込み量4.5mmを2.8、4.0、4.3、4.5mmの4回に分けて与えた。ホブ1回転当たりの創成運動(送り)は、ワークの回転角で 0.1° とした。なお、ホブのねじ運動の1ストロークには約5秒を要した。歯切りしたギヤは、歯面にわずかにびりマークが観察されたが、歯面は滑らかであった。また、ギヤ歯先の尖りは発生せず、歯先幅は内端から外端に至るまでほぼ一定であった。

5・2 かみ合い試験 歯切りしたフェースギヤの加工精度を調べるため、自作の片歯面かみ合い試験機⁽⁷⁾を用いて歯当たりと回転伝達誤差を測定した。ピニオンは、表1に示す歯車対Bの諸元のもの(SCM415浸炭焼入れ)をCNC成形歯車研削盤によってJIS4級以上に仕上げた。

図13は、ギヤ歯面(表1の歯車対B)に光明丹を塗布し、ピニオンによって除かれた部分を撮影したものである。歯すじが凹状に湾曲した凹歯面で、やや歯当たりが外端寄りに表れているが、全体として、歯当りは良好であり、ギヤの歯切りがほぼ正確に行われていることがわかる。

図14は、回転伝達誤差の測定結果を示す。凸歯面では、規則的なうねりが表れたが、凹歯面では、やや不規則なうねりが表れた。これは、明確ではないが、凹歯面の切削においては薄い切り屑が発生するため、部分的に切り残しが生じているためと考えられる。しかし、これらの歯当たり結果と回転伝達誤差の測定結果から、本研究で提案するフェースギヤのホブ切りによって、ほぼ実用に耐える高減速比用のフェースギヤが実現できる見通しを得た。

6. 結 言

以上の結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 高減速比フェースギヤのインフィードホブ切りおよびタンジェンシャルホブ切りにおいて問題であったホブの二番面干渉の有無を確認する方法を示した。
- (2) 高減速比フェースギヤの歯切りにおいて、二番面干渉や多角形誤差が生じないタップによるねじ切りに類似した新しいホブ切り法を提案した。
- (3) 提案した歯切り方法が可能なCNC制御の歯切り装置を製作し、歯切り試験、かみ合い試験を通して、製作した高減速比フェースギヤが十分実用に耐えるものであることを確認した。

文 献

- (1) Ohshima, F. and Yoshino, H., A Study on High Reduction Face Gears (1st Report, Meshing Analysis), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.72, No.720, (2006-8), pp. 2676-2682.
- (2) The Editorial Committee of Gear Handbook, *Gear Handbook*, (1962), pp.819, The Nikkan Kogyo Shimbun, LTD., (in Japanese).
- (3) Nagata, S. et al., *Tool Engineer*, Vol. 42, No.10, (1998-7), pp.15-20.
- (4) Yoshino, H. and Ishibashi, A., Design and Manufacture of Gear Cutting Tools and Gears with an Arbitrary Profile (3rd Report, A Method for Calculating Grinding-Wheel Profile for Hob Finishing), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.54, No.505, (1988-9), pp. 2174-2180.
- (5) Yoshino, H. and Ishibashi, A., Design and Manufacture of Gear Cutting Tools and Gears with an Arbitrary Profile (1st Report, Principle of Tooth Profile Calculation and Design of a Gear Hob), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.53, No.487, (1987-3), pp. 887-893.
- (6) Nagata, E., Yoshino, H. and Ohshima, F., Japanese Patent Application, H18-077024 (2006).
- (7) Yoshino, H. et al., Inspection of Tooth-modified Gears with Single Flank Gear Rolling Tester, *Proceedings of the 55th Kyushu Branch Regular Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No. 028-1, (2002-3), pp.229-230.