ホブ切り歯車の精度向上に関する研究*

(第6報, 各種誤差要因の影響を含む歯切り誤差の解析法及び実験検証)

丘 華^{*1}, 有浦泰常^{*2}, 上野健治^{*3}
尾崎弘明^{*1}, 佐藤榮一^{*1}

Improvement of Gear Accuracy in Gear Hobbing

(6th Report, A Numerical Analysis of Hobbing Accuracy by the Action of Various Influencing Factors and Its Experimental Verification)

Hua CHIU, Yasutsune ARIURA, Kenji UENO,
Hiroaki OZAKI and Eiichi SATO

There are a lot of factors influencing hobbing accuracy because hobbing is intermittent cutting and its generating motion is complex. These factors are geometrical, kinematical, dynamic or cutting mechanistic, and the errors of a hobbed gear are usually dependent on the combined effect of the factors. On the other hand, it is not easy to exactly measure the errors of the generating motion between the hob and gear blank. For these reasons, it is difficult in general to determine the valid influencing factors and to decide on a method of improvement when an engineer is facing a problem with hobbing accuracy. In this paper, a developed analysis method, which can conveniently calculate the errors of a hobbed gear in three dimensions by the action of an individual or a combination of various influencing factors, is proposed. Some useful information for improving hobbing accuracy may be obtained by applying the method to comparing and analyzing the measured data with calculated ones. It is also confirmed that this method is valid because the calculated error curves are in good agreement with measured results.

Key Words: Hobbing, Accurate Gear, Hob Error, Generating Motion Error, Tooth Profile Error, Lead Error, Pitch Error

1. 緒言

歯車装置の高荷重化・軽量化・低振動・低騒音に対する要求がますます増大しており、歯車を高精度かつ高能率に加工することがより一層望まれている。一般産業用の高精度歯車は通常ホブ切りの後、ラッピングやホーニングあるいは研削などの何らかの仕上げが施されているが、加工能率の向上及び加工コストの低減の面から、ホブ切りのみで歯面仕上げを行うこと、あるいは研削などの前加工としてホブ切りをするときにできるだけ高精度に仕上げるのが要求される。

最近、精度・剛性の高いホブ盤・ホブを使用して、良好な切削条件であればホブ切りでも高精度の歯車を加工できることが示されたが^{(1)~(4)},それは工業的に実用化までに至っていない。

一方、ホブ切りでは、ホブの誤差以外に、断続切削による振動及びホブ盤運動伝達系の製作・組立誤差な

どによる運動伝達誤差が存在する*。場合によっては、切削力加わることにより、運動伝達系の誤差は拡大されたり、また、それが歯切り精度に及ぼす影響もホブ・歯車の諸元によって変わってくることもある。従って、ホブ・ホブ盤・切削機構(例えば、構成刃先・切削熱等)の各種誤差要因の組み合わせの影響を受けた被削歯車の誤差測定データから、各誤差要因の影響を分離して、それぞれの誤差要因を調べることは容易ではない。なお、現場における切削状態でホブと被削歯車との間の運動伝達誤差を精度よく測定することも容易ではなく、たとえ何らかの方法で測定しても得られたデータの中には説明困難な成分が現れることがある。このため、ホブ切りの精度に問題が生じた場合、その誤差要因を特定して、対策・改善を検討するには困難なことが少なくない。

本報では、ホブ切り精度を向上するために誤差要因を診断する一助として、既報⁽⁵⁾のホブ切り歯形誤差の解析方法に基づいて、各種の誤差要因の影響を考慮して、被削歯車の歯すじ・円ピッチ誤差も含めた解析方法を提案する。また、切削実験により、各誤差要因の影響を分離して、本方法の有効性を確認した。

* 原稿受付 平成3年7月8日。

^{*1} 正員, 福岡大学工学部(〒814-01 福岡市城南区七隈 8-19-1)。

^{*2} 正員, 九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*3} 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)。

2. 解析方法の基本

2. 1 ホブ切り創成運動の基本式⁽⁵⁾ 図1にホブの回転座標系 $X_1-Y_1-Z_1$ と歯車座標系 $X_2-Y_2-Z_2$ を示す。ホブが ϕ_1 回転するとき、歯車が ϕ_2 回転し、同時に送り運動によって、ホブは Z_2 方向に l 移動する。両座標系には式(1)の関係がある。式(1)を用いて、ホブの製作誤差と取付誤差の影響を考慮した切れ刃上の各点の座標 (X_1, Y_1, Z_1) から被削歯車の歯みぞ内の対応点の座標 (X_2, Y_2, Z_2) が求められる。

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 \cos \phi_1 - \sin \phi_2 \sin \phi_1 \sin \Gamma & -\cos \phi_2 \sin \phi_1 - \sin \phi_2 \cos \phi_1 \sin \Gamma & \sin \phi_2 \cos \Gamma \\ -\sin \phi_2 \cos \phi_1 - \cos \phi_2 \sin \phi_1 \sin \Gamma & \sin \phi_2 \sin \phi_1 - \cos \phi_2 \cos \phi_1 \sin \Gamma & \cos \phi_2 \cos \Gamma \\ -\sin \phi_1 \sin \Gamma & -\cos \phi_1 \cos \Gamma & -\sin \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a \cdot \cos \phi_2 \\ a \cdot \sin \phi_2 \\ l \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、

$$l = |\phi_2| f / (2\pi)$$

$$\phi_2 = \pm \phi_1 (NH/Z_p) / \{1 \pm f \cdot \tan \beta / (2\pi r_2)\} \quad (\text{右巻ホブが+、左巻ホブが-}) \quad (2)$$

式の中で、 f 、 Γ 、 a はそれぞれテーブル1回転当たりの送り量、ホブの取付角及び中心間距離であり、 Z_p 、 β 、 r_2 はそれぞれ歯車の歯数、ねじれ角及びピッチ円半径であり、 NH はホブ条数である。

式(1)の3番目の式を用いて、切れ刃上の1点 (X_1, Y_1, Z_1) から歯車の任意の軸断面 $(Z_2 = Z_{20})$ との交点におけるホブ回転角 ϕ_1 を求め、この ϕ_1 を式(1)の1番目と2番目の式に代入することにより、点 (X_1, Y_1, Z_1) と断面 $Z_2 = Z_{20}$ との交点の位置 (X_2, Y_2, Z_2) が求められる。歯形創成に関与する各切れ刃が先行刃から順に断面 $Z_2 = Z_{20}$ を通るとき、各切れ刃上のそれぞれの点と断面との交点を求め、その点群の包絡は断面 $Z_2 = Z_{20}$ における歯車の歯形となる。これを理論上正しい歯形と比較することにより、歯形誤差が得られる。

2. 2 運動伝達誤差の取扱い 運動伝達誤差はホブの回転に対して、被削歯車の回転運動やホブ送り運動などの正しい創成運動からの狂いであるので、ホブ回転角 ϕ_1 をパラメータとして表すことができる。例えば、 ϕ_1 に対して、被削歯車の回転角 ϕ_2 は運動伝達誤差がないときの理論値 $\phi_2^{(0)}$ と誤差成分 $\Delta \phi_2$ からなると考えてよい。つまり、

$$\phi_2 = \phi_2^{(0)} + \Delta \phi_2 = \phi_2^{(0)} + f \phi_2(\phi_1) \quad (3)$$

同じようにして、中心間距離 a は次式で表される。

$$a = a^{(0)} + \Delta a = a^{(0)} + f_a(\phi_1) \quad (4)$$

ホブはスラスト方向に位置の変化があれば(例えば、切削力によるホブスラスト方向の振動)、切れ刃上の各点の Z_1 座標はホブの回転角 ϕ_1 に対して変動していると考えてよいので、

* 創成運動の立場から、この両者の影響はともに創成運動の周期的な誤差になるので、以下区別せずに運動伝達誤差と呼ぶ。

$$Z_1 = Z_1^{(0)} + \Delta Z_1 = Z_1^{(0)} + f_{z1}(\phi_1) \quad (5)$$

と表される。ホブ送り運動の誤差はホブの回転につれて、被削歯車のある軸直角断面、例えば $Z_2 = Z_{20}$ 断面の位置が正しい位置 $Z_{20}^{(0)}$ に対して上下変動していると考えられるので、

$$Z_{20} = Z_{20}^{(0)} + \Delta Z_{20} = Z_{20}^{(0)} + f_{z20}(\phi_1) \quad (6)$$

と表される。なお、切削中のホブの回転振動のようなホブの回転誤差については、式(2)を用いて、被削歯車の回転誤差に換算すればよい。すなわち、ホブの回転進みを被削歯車の回転遅れに、ホブの回転遅れを被削歯車の回転進みに換算すればよい。

ここで、運動伝達誤差として実測データあるいは解析データ(例えば、振動モデルによる切削振動のシミュレーションデータ)をホブの回転角 ϕ_1 に対して表示することができれば、解析において考慮することができる。また、構成刃先のような切削機構に起因した誤差要因についても、実測データか、あるいは適当なモデルによって推定したデータを運動伝達誤差として解析に考慮することも可能である。

2. 3 被削歯車の誤差 以上のように各運動伝

図1 ホブ切りにおける基本座標系

表1 ホブ・歯車諸元及び切削条件

Hob parameters		Gear parameters	
Module	6	No. of teeth	64
Pressure angle	20°	Helical angle	31°, RH
Outside dia.	130	Outside dia.	460
Rake angle	0°	Face width	86
Lead angle	2°59'	Tooth depth	12
No. of threads	1, RH	Material	SCM440
No. of gashes	12, straight	Hardness	HB240
Length	120		
Material	SKH55, TiN coat.		
Cutting conditions			
Cutting speed	82 m/min (200rpm)		
Feed	1.0 mm/rev, conventional		
Cutting depth	0.5 mm (radial direction)		
Cutting oil	Mobilmet 735		

表2 測定した創成運動伝達誤差

Component	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃
Frequency	12f ₁	24f ₁	48f ₂	96f ₂	240f ₂
Amplitude (sec.)	6.19	1.65	2.48	0.63	4.13

Note: f₁ is theoretic rotation frequency of hob.
 f₂ is theoretic rotation frequency of work table.
 Amplitude has converted into the rotation angle of work table.

図2 創成運動誤差の計測ブロック図

図3 円周上4等分位置の歯形誤差

達誤差を取扱い、これらの誤差を含んだ ϕ_2 , a , Z_1 , Z_{20} をそれぞれ式(1)と式(2)に代入して、2.1節で述べた方法と同じように解析すると、運動伝達誤差の影響を考慮した被削歯車の歯形誤差を求めることができる。

被削歯車の歯すじ誤差を求めるには、歯形誤差の計算における被削歯車の歯直角断面の位置 Z_{20} を連続的に微小間隔でずらし、各断面上の同じ半径の点での歯形誤差を計算することにより、歯すじ誤差が得られる。

被削歯車の円ピッチ誤差を求めるには、同じ歯車の軸直角断面上の隣合った同側歯面のピッチ点座標 (X_2 , Y_2 , Z_2) を求め、これから2点間の直線の長ささと標準弦の長さとの差を計算することにより、円ピッチ誤差が得られる。

3. 実験結果及びその検討

本解析法の妥当性を確認するためにNCホブ盤(テーブル径630mm)を用いて切削実験を行った。使用したホブ・歯車の諸元及び切削条件を表1に示す。ホブの実測精度はJIS0級である。切削中にホブと被削歯車との間の回転創成運動の誤差を図2に示す方法で測定して、その結果を表2に示す。ただし、表2において運動伝達誤差の周波数はそれぞれホブまたはテーブルの回転周波数に対して表示され、各周波数成分の片振幅はテーブルの回転角に換算して表されている。被削歯車の歯面は滑らかで、 R_{max} が5μm程度であり、構成刃先の影響は非常に小さい。従って、被削歯車の歯面はホブ切れ刃運動軌跡の包絡面に近いと考えられる。

図3～図5はホブの製作誤差、取付誤差及び測定した運動伝達誤差を考慮して解析した歯車の歯形・歯すじ誤差とそれらの実測結果との比較である。計算中にホブの1刃を約1500点で表し、被削歯車の歯形曲

図4 連続4枚の歯形誤差

図5 歯すじ誤差

図6 各誤差要因の単独影響による歯形誤差曲線
(No. 1 歯)

線を作用線方向0.1mmの間隔、歯すじ曲線を歯幅方向0.1mmの間隔で切れ刃軌跡の包絡線として記録した。図3は円周上4等分位置の歯形で、図4は連続4枚の歯形であり、測定位置はすべて歯幅中央である。これらの歯形・歯すじの結果からわかるようにいずれも解析曲線と実測曲線とよく一致している。いいかえると、歯切り精度に影響を与える要因は解析にほぼ考慮されていると考えてよい。また、本解析法の妥当性が実証できたと考えられる。

図6はホブの製作・取付誤差及び各運動伝達誤差成分を個々に考慮して、解析した歯形誤差を示している。これから被削歯車の歯形精度に影響する要因は主に運動伝達誤差の B_1 、 B_3 成分及びホブの製作誤差であることがわかる(ホブ両ハブの振れがそれぞれ1μmと

表3 確認実験におけるホブ・歯車諸元及び切削条件

Hob parameters		Gear parameters	
Module	4	No. of teeth	113
Pressure angle	17°	Helical angle	15°, RH
Outside dia.	150	Outside dia.	476
Rake angle	0°	Face width	86
Lead angle	1°40'	Tooth depth	11.0
No. of threads	1, RH	Material	SCM440
No. of gashes	16, straight	Hardness	HB310
Length	90		
Material	SKH55, TiN coat.		
Cutting conditions			
Cutting speed	75 m/min (160rpm)		
Feed	1.5 mm/rev, climb		
Cutting depth	0.5 mm (radial direction)		
Cutting oil	Mobilmet 735

(a) Tooth profile errors

(b) Lead errors

図7 確認実験歯車の歯形・歯すじ測定結果

2μmであるので、ホブ取付誤差の影響は非常に小さい⁽⁶⁾。

一方、運動伝達誤差の A_1 成分は片振幅が大きいかかわらず、歯形精度にほとんど影響していない。その理由として、次のように考えられる。運動伝達誤差の A_1 と A_2 成分がおそらく変動切削力に起因したホブ軸の回転振動である(ホブ刃みぞ数は12である)。仕上げホブ切りでは、歯幅上の創成位置にほとんど関係せず、各切れ刃に対して切削力の大きさと位相の変化

が小さいので⁽⁷⁾, これによる切削中ホブ軸の回転振動は安定な状態となる. この回転振動の周波数がホブ回転周波数とホブ刃みぞ数の積及びその高次のものであれば, 各切れ刃の創成位置において振動の様相(大きさ・位相)はほとんど同じになる. 従って, このような振動成分は被削歯車の歯形・歯すじにほとんど影響をしない. いいかえると, 荒削りの場合には, 歯幅にわたって切削始めと切削終わりで, 切削力の大きさと位相の変化が大きいので⁽⁷⁾, これによるホブ軸の回転振動の様相も変わる. このことから, 切削力の変動に起因したホブ軸の回転振動は一度切り歯車によく見られる歯幅上の位置によって歯形精度が変化したり, 歯すじが曲がる現象の一因であると推察できる.

以上の手法により供試ホブ盤の調整個所を確認して, 適切に機械を調整した後, 確認のためにさらに切削実験を行った. 切削した歯車の4等分位置の歯形・歯すじの測定結果を図7に, ホブ・歯車の諸元と切削条件を表3に示している. 図7を図3, 図5と比較して, 運動伝達誤差に起因した周期的な凹凸は大幅に減少し, JIS 2級の高精度の歯形・歯すじが得られたことがわかる.

4. 結 言

上述の結果をまとめると, 次の通りである.

(1) ホブ切り時のホブと歯車材との相対運動におい

て, 歯切り精度に影響を及ぼす各誤差要因を同時に考慮して被削歯車歯面の誤差を三次元的に解析できる方法を示した.

(2) 解析結果と実際のホブ切りによる歯車の実測結果を比較して, 両者はよく一致しており, 本解析法の正確さが実証できた.

(3) 各誤差要因を個々にまたは総合的に解析に考慮することにより, 歯切り精度に与える影響をそれぞれ特定して分離し, あるいはその組み合わせの効果を確認することができ, 精度を向上するために有用な情報が提供できる.

(4) 本解析法はインポリュート歯形のみならず, ホブ切りと同じ創成運動であれば, 任意な歯形の場合にも適用できる.

文 献

- (1) 梅崎・有浦・丘, 機論, 52-480, C(1986), 2167.
- (2) 丘・有浦・梅崎, 機論, 55-509, C(1989), 162.
- (3) 荒井, 日本機械学会No. 890-58歯車及び伝動機構シンポジウムパネルディスカッション資料集, (1989), 5.
- (4) 上野・鹿毛・橋谷・丘, 機講論, No. 900-59, E(1990), 25.
- (5) 有浦・丘・梅崎, 機論, 52-480, C(1986), 2160.
- (6) 丘・梅崎・有浦, 機論, 54-503, C(1988), 1525.
- (7) 梅崎・有浦・丘, 精密工学会誌, 54-1, (1988), 132.