

1929 ハイポイドギヤの歯切り誤差検出法

A Method of Detection of Errors in Hypoid Gear Cutting

○川崎 一正 (新潟大)

田村 久司 (新潟大)

Kazumasa KAWASAKI, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-nocho, Niigata
Hisashi TAMURA

A method of the detection of errors in hypoid gear cutting is proposed. The coordinates of the points on the gear tooth surfaces are measured using a three-coordinate measuring machine and the surfaces are estimated by the method of least squares so that the surfaces can fit to the data of coordinate measurements. The surfaces differ from the designed surfaces because of machine setting errors on a Gleason hypoid generator. The purpose of this method is to find the machine setting errors. The coordinates of the points on the gear tooth surfaces were practically measured and the errors were found by this method. Furthermore, the errors were compensated and the corrective cutting was carried out. As a result, the surfaces closing to the designed surfaces could be obtained. The validity was confirmed by the observation of the contact pattern for gear pair.

Key Words; Measurement, Gear, Hypoid Gear, Method of Least Squares, Machine Setting Error, Gleason Hypoid Generator, Three-Dimensional Coordinate Measuring Machine

1. はじめに

工作物の検査または測定で、加工作業中のそれは加工作業にフィードバックする目的で行われ、加工終了後のそれは工作物の合否を判定するために行われる。歯車などの検査・測定についても同じであるが、歯面が複雑なために求めようとする未知量を直接測り求めることが一般に困難であり、間接測定にならざるを得ない⁽¹⁾。

筆者の一人は、三次元の複雑な曲面の歯車歯面を三次元測定機で測定しその結果の歯切り作業へのフィードバックが可能な検査方法を提案したが⁽²⁾⁽³⁾、数多くある歯切り時の誤差要因のうちどの要因を選択すべきかその選択の仕方にあいまいさがあった。提案した検査法が実用に供せられるためには、誤差要因の選択を適切に行う必要がある。本研究はこの選択法を示すとともに、提案の検査法をハイポイドギヤに適用して、歯切り時の誤差を検出しようとしたものである。

ハイポイドギヤを歯切りするとき、工具を決められた位置に取付けるが、その取付けには誤差を伴う。この工具で歯車を歯切りすると、その工具取付け位置に対応してただ一つの歯面が得られるが、その歯面は数式表示できる。そこで、歯切りした歯面の歯面上の多数点の座標を三次元測定機で測定し、歯面測定値に最もよく適合するように、工具取付け位置の関数として表されている歯面を最小二乗法によって推定する。この推定歯面に対応する工具取付け位置と設計上のそれとの差を工具取付け位置誤差と考える。この誤差を補

正して修正歯切りを行えば、設計どおりのハイポイドギヤ歯面が得られるであろう。

2. 誤差要因の選択

歯車に固着した座標系で歯面を二つの径数 u_g, θ_g によってパラメータ表示する。この場合、 u_g, θ_g のほか工具取付け位置・姿勢などは歯切中に変動しないから、それらを表すパラメータ C_1, C_2, \dots, C_k は歯面表示式中に定数として関与してくる。よって、歯面のベクトル式は $X_g(u_g, \theta_g; C_1, C_2, \dots, C_k)$ で示される。 C_1, C_2, \dots, C_k は実際の歯切り時におけるもので、設計値との間に誤差があり、誤差要因となる。そこで、それらの誤差を歯面測定によって推定しようとするのであるが、すべての誤差要因に注目しおのおのの誤差を求めることは、定数間の独立性の問題もあり困難である⁽²⁾⁽³⁾。このような場合、歯面に対して最も大きな影響を与える誤差要因に注目するのが普通であろう。

そこでまず、 C_1 の誤差 ΔC_1 の歯面に与える影響の程度を調べてみる。そのためには、 C_1 に誤差のない歯面 $X_g(u_g, \theta_g; C_1)$ と誤差のある歯面 $X_g(u_g, \theta_g; C_1 + \Delta C_1)$ を考え、後者が前者に対しどの程度その位置を変えたかを調べればよい。位置変化は歯面間に生じた隙間の大きさを評価できる。この隙間は、歯面 X_g が直交座標系 $O-xyz$ で表示されているとして、例えばFig. 1に示すように z 方向の長さ E で表すことにすれば、 f を X_g の z 成分として

$$E = f(u_g, \theta_g; C_1 + \Delta C_1) - f(u_g, \theta_g; C_1) \quad (1)$$

次に、歯面存在領域内の歯面上に多数の点を適当に定

め、 i 番目の点における隙間を E_i とし、 E_i の二乗和 F を考える。

$$F = \sum_{i=1}^n E_i^2 \quad (2)$$

F の値は ΔC_1 の大きさによって変わるから、単位の誤差量あたりに換算する。

$$C_{C1} = \frac{\sqrt{F/n}}{\Delta C_1} \quad (3)$$

C_{C1} を C_1 の影響係数ということにする。 C_2, C_3, \dots, C_n についても同様である。それらの影響係数を $C_{C2}, C_{C3}, \dots, C_{Cn}$ とする。

ところで、影響係数の最も大きい誤差要因について誤差を推定すればよいが、それが一個だけではなく複数個存在する場合がある。そして、複数個の誤差要因が互いに独立でなく、それらが歯面に対して同じ程度の影響を及ぼす場合がある。そのようなときには、誤差要因間の独立性を調べる必要がある。そして独立性が小であるならば、いずれか一方を誤差要因とすればよい。誤差要因間の独立性は誤差要因 C_1 と C_2 を例にとり次のようにして調べることができる。

本法では誤差の二乗和 F を最小にする C_1, C_2 を求めていから、次式を得る。

$$\frac{\partial F}{\partial C_1} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial C_2} = 0 \quad (4)$$

式(4)は一般に超越方程式になるから、これを解析的に解くことは困難であり、逐次近似により数値解を求めることになるが、そのとき、 C_1 と C_2 が独立でないと式(4)の解は求められなくなる。初期値 C_1, C_2 の修正量 $\Delta C_1, \Delta C_2$ を未知数とする二元連立一次方程式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial C_1^2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \Delta C_1 + \frac{\partial^2 F}{\partial C_1 \partial C_2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \Delta C_2 &= - \frac{\partial F}{\partial C_1} \Big|_{C_1, C_2} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial C_1 \partial C_2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \Delta C_1 + \frac{\partial^2 F}{\partial C_2^2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \Delta C_2 &= - \frac{\partial F}{\partial C_2} \Big|_{C_1, C_2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

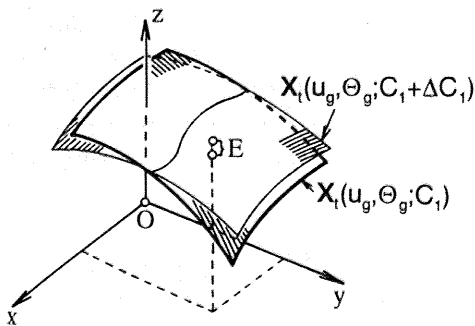


Fig.1 Relation between two tooth surfaces

C_1 と C_2 が独立でないと式(5)のヤコビの行列式 $|J|$ は零になるから、 $|J|$ の大小で C_1, C_2 の独立性の程度判定ができる。 $\partial^2 F / (\partial C_1 \partial C_2) = \mu$ とおき、 $|J|$ を次のように変形する。

$$|K| = \begin{vmatrix} \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial C_1^2} & 1 \\ 1 & \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial C_2^2} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$|K|$ の絶対値が1に対して十分小さければ、 C_1 と C_2 は従属関係にあるとみなすことができる。この場合、 C_1 か C_2 のいずれか一方に誤差があると、他方には誤差がないとする。 $|K|$ の絶対値が1に対して小さくなければ C_1 と C_2 は独立関係にあるとみなせるから、 C_1 と C_2 の両方を誤差要因にする。

3. 歯切り誤差の検出

(リング)ギヤは成形歯切りしたまがりばかき歯車である。Fig. 2にギヤの歯切方法を示す。 $O_m-x_m y_m z_m$ は歯切盤に設定した座標系で、 O_g はマシンセンタ、 x_g, y_g, z_g の各座標軸はそれぞれV, H, クレードル軸に一致している。 z_c 軸はカッタ軸でクレードル軸に平行である。 O_c はカッタ中心で、その位置は $(V_g, H_g, 0)$ にあり、これを列ベクトル D_g で表す。G軸はギヤ軸で、 O_g はギヤ歯底円すい頂点、 λ_{gr} はギヤ歯底円すい角である。環状フライスカッタの内・外両切れ刃は、グリーンソン方式では直線であるが、本研究ではそれらを曲率半径の大きな円弧にしている⁽⁴⁾。よって、カッタをその軸まわりに回転したとき、切れ刃の形成する曲面(カッタ刃面)は円すい面ではなく、それに近い回転面になる。これを擬円すい面と呼ぶ。ギヤ凸歯面歯切用カッタ刃面 X_{gc} は擬円すい面で、これはカッタに固着した座標系 $O_c-x_c y_c z_c$ で次式で表される。

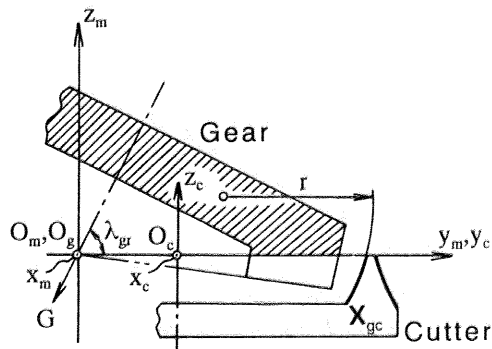


Fig.2 Cutting of ring gear

Table 1 Dimensions of hypoid gears (mm)

	Gear	Pinion
Number of teeth	41	7
Spiral angle	33° 01'	47° 47'
Module	3	
Pinion offset	18	

Table 2 Influence coefficients in ring gear cutting

C_{Rsg}	2.2×10^{-3}
C_{Asg}	0.2×10^{-3}
C_{xgr}	0.2×10^{-3}
C_{y0}	1.2×10^{-3}
C_{z0}	0.4×10^{-3}

Table 3 Results of inspection of gear tooth surface

	n	$R_{sg}(\text{mm})$	$\sigma_{\epsilon}(\text{mm})$
Result ①	24	70.146	9.8×10^{-3}
Result ②	28	70.458	8.8×10^{-3}
Result ③	20	70.353	6.4×10^{-3}

$$\mathbf{X}_{gc}(u_g, \theta_g) = \begin{pmatrix} -r \cos \theta_g \sin u_g - y_0 \sin u_g \\ r \cos \theta_g \cos u_g + y_0 \cos u_g \\ -r \sin \theta_g + z_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここに、 r はカッタ切れ刃の円弧曲率半径、 u_g, θ_g は刃面を表す径数、 y_0, z_0 は $O_c-x_c y_c z_c$ で $x_c=0$ なる平面内での円弧曲率中心の座標である。

ところでギヤ歯面はカッタ軸を傾けなくて成形歯切りされるから、ギヤ凸歯面は $O_n-x_n y_n z_n$ で $\mathbf{X}_{gc} + \mathbf{D}_g$ で表される。これをギヤに固着した座標系(Fig. 2で O_g を原点、 G を z 軸とする円筒歯表系 $O_g-R_g A_g z$)に座標変換し、 \mathbf{X}_g で表す。 \mathbf{X}_g に含まれている V_g, H_g, y_0, z_0, r などが前章の C_1, C_2, \dots, C_k に対応する。

次に、ギヤ凸歯面歯切り時の誤差要因を選択する。このとき、カッタ中心の座標 V_g, H_g を動径に相当するラジアルスライド量 $R_{sg} (= \sqrt{V_g^2 + H_g^2})$ と偏角に相当するカッタ中心旋回角 $A_{sg} (= \tan^{-1}(H_g/V_g))$ とで表しておく。

Table1に示す諸元のハイポイドギヤの影響係数を計算した。計算結果をTable2に示す。 R_{sg} と y_0 の影響係数が他のそれよりも大きくほぼ同じであるから、 R_{sg} と y_0 の独立性を調べる必要がある。そこで、前章で示した $|\mathbf{K}|$ を計算した。その結果 $|\mathbf{K}| = -0.028$ で、その絶対値は1に比べて充分小さい。よって、 R_{sg} と y_0 は従属関係にあるとみなせるので、これらのうちどちらか一方には誤差がないとする。本研究では調節しにくい y_0 には誤差がないとし、 R_{sg} に誤差があるとした。

ピニオン凹歯面歯切り時の誤差要因も同様にして調べた結果、ラジアルスライド量 R_{sp} のみに誤差があるとすることになった。

4. 実験

本法の有効性を確認するため、Table1に示すハイポイドギヤの測定実験を行った。ギヤ凸歯面についての

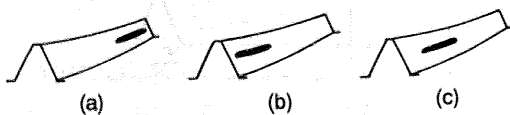


Fig.3 Contact pattern on gear tooth surface

測定結果をTable3の①に示す。表中の n は測定点の数である。また $\sigma_{\epsilon} = \sqrt{F/n}$ で、これが小さければ誤差要因の選択が正しく行われ、さらに測定値によく適合する歯面が推定されたことを意味する。測定結果より、 $R_{sg} = 70.342(\text{mm})$ で歯切りすべきところ、 $R_{sg} = 70.146(\text{mm})$ で歯切りされていたことがわかる。そこで、ラジアルスライド量 R_{sg} を $0.196(\text{mm})$ 増加させて修正歯切りを行った。修正歯切り後の測定結果をTable3の②に示す。これによると、 $R_{sg} = 70.458(\text{mm})$ で歯切りされていたことになり、何らかの原因で過修正になったと考えられる。そこでさらに、 R_{sg} を $0.116(\text{mm})$ 減少させて修正歯切りを行った。その測定結果をTable3の③に示す。これによると $R_{sg} = 70.353(\text{mm})$ で、正しく歯切りされていると判断できる。ピニオン凹歯面の測定も行った。その結果、歯切り誤差は小さく、正しく歯切りされていることがわかった。

さて、正しく歯切りされたピニオン凹歯面と測定結果①、②、③のギヤ凸歯面をそれぞれかみあわせてみた。そのときのギヤ凸歯面上での歯当たりスケッチ結果をFig. 3に示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ測定結果①、②、③のギヤ凸歯面に対応している。修正歯切りにより歯当たりが歯の中央部に移っている。この歯車対では、歯の中央部に歯当たりが出るように設計している⁽⁴⁾。

5. おわりに

ハイポイドギヤの歯面は三次元の複雑な曲面である。その歯面を三次元測定機で測定して、その測定結果から歯切り時の工具取付け位置誤差を検出した。そして、検出した誤差を歯切り作業にフィードバックし、修正歯切りの効果を確かめることができた。

終わりに、測定・歯切実験にご協力いただいたスズキ(株)竹内慎一課長、羽田芳智主任にお礼申し上げる。

文献

- (1) 青木, 精密測定(1), 1957, 4, コロナ社.
- (2) 田村, 機論, 52-478, C(1986), 1798.
- (3) 大矢他2名, 機論, 58-547, C(1992), 864.
- (4) K. KAWASAKI, H. TAMURA, Proc. MPT' 91(1991)692.