歯車の成形研削に関する研究 (第4報)*

—サイクロイド歯車の研削—

津田 展宏** 石川 二郎*** 福田 康正†

A Study on Form Grinding of Gears (4th Report)

—Grinding of Cycloidal Tooth Profiles—

Nobuhiro TSUDA, Jiro ISHIKAWA, Yasumasa FUKUDA

Many kinds of gear tooth profiles and teeth combined with different profile curves, have been proposed. Otherwise, how to manufacture their profiles has ever been reported little. Even if the dressing apparatus, belonging to the well-known involute gear grinding machine, which can grind the modified involute tooth profiles, is used, it is impossible to manufacture particular tooth profiles other than involute tooth one. Here, the compound cycloidal tooth profile which has never been reported to grind, is made trial of manufacturing by means of N/C gear grinding machine developed by authors. The specifications of ground cycloidal gear are shown as follows: number of teeth 48, pitch diameter 96 mm, radius of rolling circle 4.8 mm, and both addendum and dedendum are 2 mm. Inspection of ground gears is held by means of the single frank meshing tester, which is newly developed applying digital computer. Two cycloidal gears composed of the same dimension are ground and meshed. The results of inspection is 60 seconds while 10 teeth profiles are meshed.

1. 緒 言

最近, 種々の歯車歯形, あるいは既知の歯形の組合せ歯形¹⁾が報告されているが, その工作法については記述されていない. また現在広く実用化されているインボリュート歯車研削盤の歯形修整装置を利用してもその歯形工作は困難な現状である. そこで研削例が報告されていない歯車歯形として交換性複合サイクロイドをあげ, 筆者らが新しく開発した円弧基準式歯車研削装置^{2)~4)}によってその研削を試みる.

2. サイクロイド歯車の研削

図1は, アデンダム部分がエピサイクロイド, デデンダム部分がハイポサイクロイドの交換性複合サイクロイド歯形を示す. 歯車の中心を O_s , サイクロイドの起点を通る直線 O_sP_y' を y' 軸とする $O_sX'y'$ 直角座標系において, エピおよびハイポサイクロイド上の一点 $C_E(X_e, Y_e)$, $C_H(X_h, Y_h)$ は,

$$\left. \begin{aligned} X_{e,h} &= \pm (R_1 \pm c) \sin \theta - c \sin \left(\frac{R_1 \pm c}{c} \cdot \theta \right) \\ Y_{e,h} &= (R_1 \pm c) \cos \theta \mp c \cos \left(\frac{R_1 \pm c}{c} \cdot \theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

と表される. ただし, 正負の記号は上部符号をエピサイクロイド, 下部をハイポサイクロイドとする. また, R_1 をピッチ円半径, c を転がり円径, θ, ϕ は図1に示す角度とする.

最初にサイクロイド歯形の円弧による近似を試みる. 筆者らは第1報⁵⁾において, 最小自乗法により歯車歯形

図1 交換性複合サイクロイド歯形

* 原稿受付 昭和50年6月7日. 昭和49年度精機学会長野地方講演会(昭和49年10月2日)にて発表.

** 正会員 東京工業大学大学院(現在, 計量研究所; 東京都板橋区加賀1-10-4)

*** 正会員 東京工業大学精密工学研究所(東京都目黒区大岡山2-12-1)

† 正会員 東京精密測器(株)(川崎市高津区宇奈根759)

エピサイクロイド: $A=6.3915$, $B=47.0896$, $a=4.9063$

ハイポサイクロイド: $A=-4.9666$, $B=48.9101$, $a=6.6056$

単位: mm

図2 サイクロイド歯形の円弧近似

$z=48$, $R_1=48$ mm, $c=4.8$ mm

図3 $O_2(A, B)$ の設定可能範囲

上の数点を抽出し、それらの点の近傍を平均して通過する円弧を求める方法を報告した。この方法をサイクロイド歯形に適用する。抽出点は転がり円の回転角、 θ, ϕ を等間隔にとり、対応する歯形曲線上の点とする。図2は、交換性複合サイクロイド歯形のエピ、ハイポサイクロイド曲線からそれぞれ6点抽出したときの、得られた円弧との偏差、および近似円の寸法を示す。交換性複合サイクロイド歯形を1個の円弧で置換しても、0.27 mm の大きな偏差となるが*、エピ、ハイポと2個の円弧で砥石成形し、研削すれば、最大 14 μ m にまで減少している。

次に、厳密な交換性複合サイクロイド歯形を工作することを試みる。

筆者らによる円弧基準砥石成形法によると、次式**で示される円弧運動 ε と直線運動 δ の合成によって交換性サイクロイド歯形が成形される。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sin^{-1}\{(A - X_{e,h})/a\} \\ \delta &= \sqrt{(L + B - Y_{e,h})^2 - (L - a \cos \varepsilon)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

サイクロイド歯形を研削する場合も、砥石成形可能条

件: $B \geq Y_{e,h} - \sqrt{a^2 - (A - X_{e,h})^2}$ *** を満足する $O_2(A, B)$ の設定可能範囲が求められる。図3は、歯数が48, $R_1=48$ mm, $c=4.8$ mm, アデンダム, デデンダム共に 2 mm の複合サイクロイド歯形の場で、 $a=22$ mm のときである。同図において、インボリュート歯形研削時においてあらわれた U_3 領域つまり回転角 ε が増加するに従って直進運動 δ は単調に減少する領域は存在しない。したがって交換性サイクロイド歯形を研削するためには、ドレッサの丸み半径を小さくして U_2 領域に回転中心を設定するか、あるいは第3報図5(c)に示す形状のドレッサを用いて U_1 領域に設定することになる。砥石成形時には $a=53.712$ mm, $O_2(A, B)=(44.493$ mm, 16.980 mm) と設定したが、この位置は U_1 領域に属している。

また、 $L=120, 140, 160$ mm とし、そのときのドレッサの回転中心座標 (A, B) の設定可能範囲もあわせて記入した。

図4は、式(2)の ε, δ の関係に従ってエピサイクロイドを発生させる積分器の結合図である。インボリュートの場合と、I7, I1~4 の Y レジスタ (例えば I7 では $c/(R+c)$) が異なるが、他は全く同じとなる。ハイポサイクロイドの場合には、I7 は $c/(R_1 - c)$, I1 が $-(R_1 - c) \sin\left(\frac{c}{R_1 - c} \theta - \zeta\right)$, I2 が $(R_1 - c) \cdot \cos\left(\frac{c}{R_1 - c} \theta - \zeta\right)$ と変化する。

図5は、研削した交換性複合サイクロイド歯形であり、ピッチ点近傍で曲率が急に変化し、その特徴が認められる。

3. 交換性複合サイクロイド歯形の検査

サイクロイド歯形を検査するための専用機が現存しないので、万能測長顕微鏡視野内の十字線の交点に、研削された歯形の輪郭の一点を合致させ、読取り、計算値と比較する方法をとる。

図1において、研削された歯形を破線で示し、その一点 $C_E'(x, y)$ を測定したとする。 C_E' を、 O_3 を中心として ζ だけ回転させると、エピサイクロイド上の一点 $C_E(X_e, Y_e)$ に一致すると考えると、 C_E' と C_E は同一円周上に存在することになり、

$$X_e^2 + Y_e^2 = x^2 + y^2 \quad (3)$$

となる。

式(1)で表される (X_e, Y_e) を、式(3)に代入して θ を求めると

* この場合、サンプリング数11個。

** 文献3)における式(7),(8)に対応する。

*** 文献3)における式(2)に対応する。

実際の砥石成形形においては, $a=53.712 \text{ mm}$, $O_2(A, B)=(44.493 \text{ mm}, 16.980 \text{ mm})$ として $z=48$, $R_1=48$, $c=4.8$ のサイクロイド歯形が研削される

図4 エピサイクロイドの発生

$z=48$, $R_1=48 \text{ mm}$, $c=4.8 \text{ mm}$

図5 研削された交換性複合サイクロイド歯車

$$\theta = \frac{a}{R_1} \cdot \cos^{-1} \frac{(R_1 + a)^2 + a^2 - x^2 - y^2}{2a(R_1 + a)} \quad (4)$$

したがって, この θ の値のときの (X_e, Y_e) が $C_E'(x, y)$ に対応する点となる。

$C_E'(x, y)$ を座標変換すると, $C_E(X_e, Y_e)$ となるのであるから,

$$\begin{cases} x = X_e \cos \zeta - Y_e \sin \zeta \\ y = Y_e \cos \zeta + X_e \sin \zeta \end{cases} \quad (5)$$

式(5)から ζ を求めると

$$\zeta = \cos^{-1} \frac{xX_e \pm \sqrt{(xX_e)^2 - (X_e^2 + Y_e^2) \cdot (x^2 - Y_e^2)}}{X_e^2 + Y_e^2} \quad (6)$$

† 最初に測定された点か, ハイポサイクロイド上の一点であるとき,

$$\phi = \frac{c}{R_1} \cos^{-1} \left\{ -\frac{(R_1 - c)^2 + c^2 - x^2 - y^2}{2c \cdot (R_1 - c)} \right\}$$

と求められる。

図6 歯形検査

$z=48$, $R_1=48 \text{ mm}$, $c=4.8 \text{ mm}$ の同諸元2個の研削歯車による

図7 演算式かみあい試験機によるかみあい試験結果

測定された他の歯面上の点は, 式(6)による ζ によって変換され, それに対応する (X_e, Y_e) と比較される。

図6は, 研削した歯面の10点を万能測微顕微鏡によって測定し, 交換性複合サイクロイド歯形と比較したものであるが, 両者はよく一致している。実際に50倍の投影機に拡大しても, それらの差は認められない。

図7は, 同諸元の交換性複合サイクロイド歯車を2個研削し, 演算式一歯面かみあい試験機⁶⁾により, かみあい試験を行った結果であるが, 10個の歯のかみあいでは, 60秒の誤差であった。かみあい誤差60秒は, そのほとんどが歯形誤差によるものであるが, これは歯形誤差の $7 \mu\text{m}$ に相当する。

4. 結 論

交換性複合サイクロイド歯形を、新しく開発した円弧基準方式歯車成形研削装置によって研削することを試みた。その際ドレッサの半径が定まったときの、回転中心の設定可能範囲、積分器の組合せによるサイクロイド曲線の発生、および砥石径の限界寸法を考察したが、いずれもインポリュート歯形研削時と同じ操作によって、成形研削可能であることが判明した。実際に歯数48、ピッチ円半径48mm、ころがり円半径4.8mmの交換性複合サイクロイドを研削したが、その歯形は理論歯形とよく一致し、しかも同諸元の研削された2個の歯車の、一歯面かみあい試験では、10歯のかみあいでは60秒の誤差で

あった。

参 考 文 献

- 1) 例えば、寺内喜男：合成歯車歯形の設計条件について、日本機械学会講演論文集，10（1971）910。
- 2) 津田展宏，石川二郎，福田康正：歯車の成形研削に関する研究（第1報），精密機械，40，8（1974）666。
- 3) 津田展宏，石川二郎，福田康正：歯車の成形研削に関する研究（第2報），精密機械，40，11（1974）1000。
- 4) 津田展宏，石川二郎，福田康正：歯車の成形研削に関する研究（第3報），精密機械，41，3（1975）273。
- 5) 2)に同じ。
- 6) 梶谷 誠，石川二郎，加藤平三郎：演算式一歯面かみあい試験機，昭和48年度精機学会春季大会学術講演会前刷，10（1973）193。

新製品紹介

DPS (デジタルポジショニングシステム)

DPS (デジタルポジショニングシステム) は黒田精工と東研エンジニアリングで共同開発したシステムであり、アクチュエータ、リニアパルスエンコーダ、プリセット付リバーシブルカウンタから構成されている。特に空圧機器と電子制御機器を世界で初めて結合したことによって、今まで不可能とされていた遠隔操作でシリンダのストロークを任意の位置で、しかも高精度で制御することが可能となるとともに、コンピュータとの結合も可能となった。このことは今後ますます行われるであろうDDC (ダイレクトデジタルコントロール) を主体としたローコストオートメーションに大きく貢献する。

特 長

1. 空気圧機器 (シリンダ、バルブ) と電子制御機器 (電子カウンタ) を初めて結合してできた、非常に高精度で安価なコントロールシステムである。
2. 空気だけでなく、油圧シリンダにも適用でき、現在の機器の改善にも寄与できる。
3. シリンダのストロークを空気 (0~2mm 以下)、油圧 (0~1mm 以下) の精度で任意の位置で制御できる。
4. シリンダのストローク位置決め制御は、リバーシブルカウンタ方式を使用するため、非常に簡単に操作できる。
5. 誤差補正機構を内蔵しているため、累積誤差は生じない。
6. ロック機構は特殊な構造を採用しているため、長寿命 (300万回以上) である。
7. 今まで不可能とされていた、遠隔操作によるシリンダストロークの制御が可能となるとともに、シリンダの複数制御、シーケンス制御、コンピュータ制御も可能となった。

黒田精工株式会社

〒145 東京都大田区北千束 2-26-11 電話=03-726-2351

DPS の構成および空気回路図