はすばコンケーブコニカルギヤのセンターボール法の開発*

張 建 輝^{*1}, 三 留 謙 一^{*2}, 大 町 竜 哉^{*2}

Development of Center-Ball Measurement of Helical Concave Conical Gear

Jianhui ZHANG^{*3}, Ken-ichi MITOME and Tatsuya OHMACHI^{*3} Yamagata University, Dept. of Mechanical Systems Engineering,
Jo-nan 4-3-16, Yonezawa, Yamagata, 992-8510 Japan

A control method of finishing dimensions of a helical concave conical gear, called center-ball measurement, is newly developed. The tooth surface of the concave conical gear is different from that of the conical involute gear, which is concave compared to the tooth surface of the conical involute gear. So the over-ball measurement of the conical involute gear can not be used as it is, but can be applied to a special measuring conditions. This center-ball measurement is based on the over-ball measurement of the helical conical gear. But in this method, the measuring ball, which is composed of two hemispheres, must be used. So the over-ball diameter can not be measured, but a center-ball diameter, which is the distance between two ball centers, can be measured instead. In this research, first the measuring condition is established. Second the center-ball diameter is obtained analytically. Finally, the center-ball diameter is verified through experiments. The experiments prove that this method has opened a door to the control of finishing dimensions in hobbing and grinding of the helical concave conical gear.

Key Words: Concave Conical Gear, Helical Concave Conical Gear, Control of Finishing Dimensions, Center-Ball Measurement, Over-Ball Measurement, Experiment

1. 緒 言

コンケーブコニカルギヤは著者の一人によって考案された新しいタイプのコニカルギヤである^{(1)~(3)}。これは正規のコニカルギヤよりも大きな動力を伝えることができる。そして、現在このギヤは、船舶用トランスミッション、底排型かくはん機、ハイポイドギヤ歯切り創成盤および歯車研削盤などに使用されるようになっている。

はじめに、はすばコンケーブコニカルギヤについては、その設計・製作法および仕上げ寸法管理法が、著者らの研究によって、すでに確立されている^{(4)~(7)}。

次に、はすばコンケーブコニカルギヤについては、その設計・製作法が、ここ近年ようやく確立されてきた^{(8)~(11)}。それにつれて、このギヤは、船舶用トランスミッションでは、従来のはすばコニカルギヤに代わって、多用されるようになってきた。しかし、このギヤの仕上げ寸法管理法はまだ確立されていない。仕上げ寸法管理は今でも近似的かつ試行錯誤的に行われてい

るのが実状である。このため、正確な仕上げ寸法管理法の確立が、緊急な課題となっている。

著者らは、この課題を解決することを直接の目標としてきたが、今度、センターボール法と呼ぶ新しい方法を開発した。以下これを報告する。

なお、本センターボール法がこれまでのオーバボール法と大きく異なるのは、図1に示す測定ボールを用いることにある。このボールは、同じ球心を持ちしかも直径の異なる二つの球面から構成されている。このボールを用いる場合は、オーバボール径を測定できず、代わりにボールの中心間の距離を測定する。そしてこの距離をセンターボール径と呼んでいる。本論文で本法をセンターボール法と呼ぶのは、このためである。

2. はすばコンケーブギヤの歯面

図2に、はすばコンケーブギヤの歯面を示す。図3

Fig. 1 Measuring ball composed of two hemispheres

* 原稿受付 2000年4月5日。

^{*1} 正員, 山形大学大学院 (〒992-8510 米沢市城南4-3-16)。

^{*2} 正員, 山形大学。

E-mail: td079@dip.yz.yamagata-u.ac.jp

は、はすばコニカルギヤの正規の歯面とそれに対応するはすばコンケーブギヤの歯面を示す。ここで、添字 l および r はそれぞれ左および右歯面を意味する。図3で、曲面 A_l および A_r は正規のコニカルギヤの歯面であり、曲面 B_l および B_r はコンケーブギヤの歯面である。

はじめに左歯面についてだけ論ずる。いま左歯面 A_l の基礎円筒に接する平面を考える。この平面と歯面 A_l の交線を l_l とし、この平面と歯面 B_l の交線を l'_l とする。交線 l_l は直線となり、歯面 A_l の創成母線である。交線 l'_l は曲線となり、歯面 B_l の創成母線である。直線 l_l と曲線 l'_l の間の距離は、歯面上の接点の軌跡 v_{ol} においては零であり、それから離れるにつれて大きくなる⁽³⁾。右歯面についても、同じように論ずることができる。

3. はすばコニカルギヤのオーバボール法

はすばコニカルギヤのオーバボール法を図4に示す。なおこれは周知のことであるが、本論文の基礎であるので以下に要約しておく⁽¹²⁾。

図4での直線 S_0S_0 は測定基準正面を意味し、直線 SS は歯車の基準正面を意味する。基準正面 SS における正面転位係数 x は零であり、平面 S_0S_0 と SS の間の距離を B_0 とする。直線 $S'S'$ はボールの中心を通る正面を意味する。これを測定正面と呼ぶ。平面

Fig. 2 Helical concave tooth surface

Fig. 3 Helical concave tooth surface compared with tooth surface of helical conical involute gear

S_0S_0 と $S'S'$ の間の距離を B とする。またバックラッシを与えるためのピッチ円上の歯厚の減少分を C_0 とする。

はすばコニカルギヤの基本諸元は創成ラック歯直角モジュール m 、創成ラック歯直角圧力角 α_0 、創成ラック中心面における歯すじのねじれ角 ϕ 、創成ラックの創成円すい角 δ および歯車の歯数 z である。はすばコニカルギヤのオーバボール径 D_m およびセンターボール径 D_p は、はすばコニカルギヤの基本諸元 $m, \alpha_0, \phi, \delta, z$ 、歯面測定用のボールの直径 d_p および距離 B_0, B, C_0 の関数、

$$\left. \begin{aligned} D_p &= f(m, \alpha_0, \phi, \delta, z, d_p, B_0, B, C_0) \\ D_m &= D_p + d_p \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

として求められる。

Fig. 4 Over-ball measurement of helical conical involute gear

Fig. 5 Contact between ball and tooth surface in plane in contact with base cylinder

4. すぐばコンケーブコニカルギヤのオーバボール法

次にすぐばコンケーブコニカルギヤのオーバボール法も本論文の基礎となるので、以下に要約しておく。

図5に、ボールとこのギヤの左歯面の接触を示す。図5において直線 S_0S_0 は測定基準正面を意味し、直線 SS は基準正面を意味する。直線 $S'S'$ はボールの中心を通る正面を意味する。これを測定正面と呼ぶ。直線 l はすぐばコニカルギヤの歯面の創成母線である。直線 l と直線 SS の交点を Q とする。曲線 l' はすぐばコンケーブ歯面の創成母線であり、点 Q で直線 l と接触している。

もし測定ボールがこの点 Q でコンケーブ歯面に接触できるなら、すぐばコニカルギヤのオーバボール法は、すぐばコンケーブコニカルギヤのオーバボール法として適用される。このときの測定基準正面 S_0S_0 から測定正面 $S'S'$ までの距離 B を、測定距離 B_c とし式(2)で表す。

$$B_c = B_0 - (d_p/2) \sin \beta_g \dots \dots \dots (2)$$

5. はすばコンケーブコニカルギヤのセンターボール法

5.1 はすばコンケーブコニカルギヤの問題点

図6に、はすばコンケーブコニカルギヤの左右の歯面と直径 d_p のボールの接触を示す。ここで、直線 l_l と l_r ははすばコニカルギヤの左右歯面の創成母線であり、曲線 l'_l と l'_r ははすばコンケーブコニカルギヤ

の左右歯面の創成母線である。

はじめに左歯面において、直線 l_l と直線 SS の交点を Q_l とする。曲線 l'_l は点 Q_l で直線 l_l と接触している。次に右歯面において、直線 l_r と直線 SS の交点を Q_r とする。曲線 l'_r は点 Q_r で直線 l_r と接触している。

いまボールが点 Q_l で左歯面と接触するなら、点 Q_r で右歯面と接触できない[図6(a)]。また、ボールが点 Q_r で右歯面と接触するなら、点 Q_l で左歯面と接触できない[図6(b)]。この理由により、はすばコニカルギヤのオーバボール法もまたすぐばコンケーブコニカルギヤのオーバボール法も、そのままでは、はすばコンケーブコニカルギヤに対しては、適用できない。

5.2 測定条件

はすばコンケーブコニカルギヤのオーバボール法を実現させるためには、ボールを二つの点 Q_l と Q_r で同時に歯面に接触させる必要がある。これを実現させるためには、単一のボールでは不可能で、左歯面用ボールと右歯面用ボールの直径を異ならせる必要がある。このために考案したのが、図1に示した二つ球面から構成される測定ボールである。これを本論文では二球面ボールと呼ぶ。

図7に、この測定条件を満たして、二球面ボールがはすばコンケーブコニカルギヤの左右の歯面と接触している様子を示す。ここでは、左および右歯面のそれぞれに対して、基礎円筒に接する平面で歯面とボールを切断した断面図、およびボール中心を通る測定正面 $S'S'$ におけるボールと歯車を示す。さらに図8は前者の拡大図である。二球面ボールは点 Q_l で左歯面とまた点 Q_r で右歯面と接触しており、その中心は直線 $S'S'$ 上にある。ゆえに、この場合は、はすばコニカルギヤのセンターボール径 D_p の式(1)を、はすばコンケーブコニカルギヤのセンターボール径として適用できる。

測定基準正面 S_0S_0 から測定正面 $S'S'$ までの距離 B を、測定距離 B_c とし式(3)で表す。

$$B_c = B_0 - (d_{pl}/2) \sin \beta_{gl} = B_0 - (d_{pr}/2) \sin \beta_{gr} \dots \dots \dots (3)$$

式(3)から、二球面ボールの二つの直径 d_{pl} と d_{pr} の間には次式の関係がある。

$$d_{pl} = d_{pr} (\sin \beta_{gr} / \sin \beta_{gl}) \dots \dots \dots (4)$$

5.3 はすばコンケーブコニカルギヤのセンターボール径の計算手順

はすばコンケーブコニカルギヤのセンターボール径を求める計算手順を図9に示す。ここで、歯車の諸元は以下の式で求められる⁽¹³⁾。正面圧力角 α_{sr} , α_{sl} は

$$\tan \alpha_{sr} = \tan \alpha_0 \cos \delta \sec \phi + \sin \delta \tan \phi \dots (5)$$

Fig. 6 Contact between ball and tooth surface of helical concave conical gear

Fig. 7 Contact between ball composed of two hemispheres and tooth surfaces of helical concave conical gear

Fig. 8 Contact between measuring ball composed of two hemispheres and tooth surfaces of helical concave conical gear

$$\tan \alpha_{sl} = \tan \alpha_0 \cos \delta \sec \psi - \sin \delta \tan \psi \cdots (6)$$

ピッチ円筒ねじれ角 β_r, β_l は

$$\tan \beta_r = \tan \psi \cos \delta - \tan \alpha_0 \sin \delta \sec \psi \cdots (7)$$

$$\tan \beta_l = \tan \psi \cos \delta + \tan \alpha_0 \sin \delta \sec \psi \cdots (8)$$

基礎円筒ねじれ角 β_{gr}, β_{gl} は

$$\tan \beta_{gr} = \tan \beta_r \cos \alpha_{sr} \cdots (9)$$

$$\tan \beta_{gl} = \tan \beta_l \cos \alpha_{sl} \cdots (10)$$

正面モジュール m_s は

$$m_s = m \sec \psi \cdots (11)$$

ピッチ円筒直径 d_b および基礎円筒直径 d_{gr}, d_{gl} は

$$d_b = z m_s \cdots (12)$$

Fig. 9 Flow-chart of center-ball diameter D_p

$$d_{gr} = z m_s \cos \alpha_{sr} \dots\dots\dots (13)$$

$$d_{gt} = z m_s \cos \alpha_{st} \dots\dots\dots (14)$$

6. 実 験

6・1 準備 図10にセンターボール径の測定法を示す。はじめにセンターボール径の基準値 D_{p0} を目盛り上に決定しておく。図10(a)に示すように、 H を基準ゲージの長さ、 h を測定ボール上の長さとし、 $D_{p0} = H + 2h$ とする。ここで、左ボールを左右に移動させ、目盛り上の読みが基準値 D_{p0} に一致するように、左のボールの位置を決める。こうすることにより、図10(b)に示す実際の測定においては、目盛り上の読みがセンターボール径 D_p を示す。

6・2 実験 はすばコンケーブコニカルギヤの基本諸元は、はすばコニカルギヤの基本諸元 $m, \alpha_0, \psi, \delta, z$ およびラック形回転工具のピッチ円半径 r_c である⁽⁸⁾。実験に用いたギヤの基本諸元および距離 B_0 を表1に示す。これらのギヤを、当研究室のコンケーブコニカルギヤ用歯車研削盤によって製作した⁽¹¹⁾。図11に、試験ギヤ No. 1 の研削のようすを示す。

表2に二球面ボールの直径の設計値 d_{pl} および d_{pr} を示す。図12には、マイクロメータに取付けたギヤ No. 1 用の二球面ボールを示している。大きなボール(直径 d_{pr}) はプロファイル研磨機により加工されている。その表面粗さは図13に示すとおり、 $3\mu\text{m}$ 以内である。直径 d_{pr} は、設計値に対し、No. 1 では $-2 \sim +1\mu\text{m}$ であり、No. 2 では $-1 \sim +1\mu\text{m}$ であった。小さなボール(直径 d_{pl}) は市販のボールである。小さなボールは、その中心が大きなボールの中心と一致するように、大きなボールに埋め込まれている。

Fig. 10 Measuring method of center-ball diameter D_p

図14にはセンターボール径測定の様子を示す。図15および16にセンターボール径 D_p を示す。実線ははすばコニカルギヤとしての理論値であり、○印ははすばコンケーブコニカルギヤの測定値である。

この図に示すように、測定値は $B = B_c$ において理論値とよく一致している。理論値に対する測定値の差

Table 1 Basic dimensions of concave conical gears

$N_o.$	m	α_0	ψ	δ	z	r_c	B_0
$N_o. 1$	3	30°	15°	45°	32	59.20	4.82
$N_o. 2$	3	20°	5°	30°	32	71.70	4.34

Table 2 Diameters d_{pl} and d_{pr} of measuring ball

$N_o.$	d_{pl}	d_{pr}
$N_o. 1$	3.000	7.875
$N_o. 2$	3.000	7.252

Fig. 11 Grinding of concave conical gear

Fig. 12 Measuring ball set on micrometer

Fig. 13 Roughness of measuring balls

Fig. 14 Measurement of center-ball diameter D_p

は, No. 1 で 0.01 mm および No. 2 で 0.02 mm である。このことは, 条件 $B=B_c$ において, 本センターボール法が有効であることを証明している。

7. 考 察

(1) 本センターボール法では, 二球面ボールを用いている。これは同じ球心を持ちしかも直径の異なる二つの球面から構成されている。これを製作するのは容易ではなく, しかも時間と費用がかかる。しかし, 現段階では, はすばコンケーブコニカルギヤの仕上げ寸法を管理できるのは, この方法だけである。

(2) 単品あるいは少量の生産の場合には, 本法はコスト的に高くつく。しかし, 船舶用トランスミッションのように, 同じギヤを量産する場合には, 本法は十分実用的である。

8. 結 言

はすばコンケーブコニカルギヤのセンターボール法を開発した。これにより, このギヤのホブ切りおよび研削における仕上げ寸法の管理が可能となった。

文 献

- (1) Mitome, K., Concave, Conical Gear (Basic Theory of a New Tooth Surface and Design of a Pair of Gears), *Int. conf. motion transm.*, 3 D 2 (1991) 601-611, Hiroshima, Japan.
- (2) 三留謙一, コンケーブ円すい形歯車, 日本特許第 2003073 号, 特許公報, 特公平 7-33863, 日本国特許庁.
- (3) 三留謙一, コンケーブコニカルギヤ, 機論, **65**-632, C (1999), 1629-1634.
- (4) 三留謙一・大町竜哉・張建輝, 交差軸用コンケーブコニカルギヤの設計法, IMPT-100 講演論文集, (1997), 443-448.

Fig. 15 $B-D_p$ Curved lines of conical and concave gears Fig. 16 $B-D_p$ Curved lines of conical and concave gears

- (5) Mitome, K., Generating of Straight Concave Conical Gear, *4th World Congress on Gearing and Power Transmission*, Vol. 1 (1999), 609-621, Paris.
- (6) 大町竜哉・三留謙一・田村健・小松原英範, コンケーブコニカルギヤ用歯車研削盤の試作研究, 機論, **65**-639, C (1999-11), 4464-4469.
- (7) 張建輝・三留謙一・大町竜哉, すぐばコンケーブコニカルギヤの仕上げ寸法管理法, 機論, **65**-640, C (1999), 4807-4812.
- (8) Komatsubara, H., Mitome, K. and Ohmachi, T., Development of Concave Conical Gear Used for Marine Transmissions, *4th World Congress on Gearing and Power Transmission*, Vol. 1 (1999), 683-699, Paris.
- (9) 小松原英範・三留謙一・大町竜哉, 船用トランスミッション用コンケーブコニカルギヤの開発(第1報, ヘリカルコンケーブコニカルギヤの創成法), 機論, **65**-638, C (1999), 4179-4184.
- (10) 小松原英範・三留謙一・大町竜哉, 船用トランスミッション用コンケーブコニカルギヤの開発(第2報, ヘリカルコンケーブコニカルギヤの創成法), 機論, **65**-638, C (1999), 4179-4184.
- (11) 小松原英範, 山形大学博士学位論文, (2000).
- (12) 三留謙一・建部研, はすば円すい形インボリュート歯車のオーバボール法の開発, 機論, **57**-538, C (1991), 2138-2143.
- (13) 三留謙一, 円すい形インボリュート歯車の研究(第1報)設計および製法, 機論, **48**-430, C (1982), 852-857.