焼結ロジックス歯車の応用例

山田 淳一, 菖蒲 次憲

日立粉末冶金㈱, 〒271 松戸市稔台520.

Application of Special Tooth Profile ("Logi X") to P/M Gear

Junichi Yamada and Tsugunori Shobu

Hitachi Powdered Metals Co., Ltd., 520 Minoridai, Matsudo 271.

Received July 12, 1996

SYNOPSIS

The "LogiX" tooth profile making up for some demerits of Involute tooth profile excelled in surface durability and wear-abrasion resistance because of many points on the tooth profile having being zero relative curvature and specific sliding. The usage of this tooth profile can expand the application fields of P/M gears which have been limited in the past due to their lower surface durability and wear-abrasion resistance. Furthermore, it makes possible to use conventional material in exchange for expensive high strength material and to eliminate the heat treatment process. This report will show a characteristic of "LogiX" tooth profile, basic properties and the application on it to oil pump gears. This profile is now under the application in mass production for the Diesel Engine Oil Pump gears.

KEY WORDS

LogiX tooth profile, surface durability, wear-abrasion.

1 緒 言

インボリュート歯形は、凸面同士の噛み合いをし、しかもピッチ点以外ではすべり接触となる。従って、歯面間の接触応力は大きく、またすべり接触であるため摩耗しやすい歯形である。一方、ロジックス歯形は凹面と凸面の噛み合いをして、接触応力やすべり率が小さく、歯面強度や摩耗に対して有利な歯形である。¹⁾ この特徴を生かし、強度上の問題で焼結化が困難な分野への適用や現行歯車の熱処理工程の削除が期待できる。そこで、この歯形の特性評価を行って、焼結化が困難な分野とされていたディーゼルエンジン用の潤滑歯車ポンプに実用化した。^{2) 3)}

本報告ではロジックス歯形の特性と歯車ポンプへの適用例を示すと共に、実用上必要である歯形の測定方

法について検討した結果を報告する。

2 ロジックス歯形の原理と特徴

2.1 ロジックス歯形の基本原理

ロジックス歯形は微少インボリュート曲線を繋ぎ合わせてラック歯形を構成する。Fig. 1は基準ラックを示す。各微少インボリュート曲線の接点の曲率半径の中心は全てピッチ線上に存在し、基準ラックの歯形はピッチ点を基準に点対称に展開するため、このラックによって創成された一対の歯車は相対曲率0の点が数多く存在することになる。

2.2 接触応力の比較

Fig. 2はインボリュート歯形とロジックス歯形の一対の接触状態を示す。一対の歯形の接触はインボリュ

Fig. 1 Basic rack tooth profile and curvature center positions.

Convex curve 	Convex/Concave curve
Point contact	Face contact
Involute tooth profile	LogiX tooth profile

Fig. 2 Tooth contact condition.

Table 1 Comparison of contact stress.

Tooth profile	Involute	LogiX
Torque (N · m)	2.94	
Gear specification	m=2.5, Z1=Z2=10, Width 12mm	
Radius curvature	ρ_1	7.4
	ρ_2	16.0
Contact stress σ (MPa)	333	176

ト歯形は凸面同士の接触であるのに対して、ロジックス歯形は凹面と凸面の接触となる。ヘルツの接触理論では、凸面同士の接触と凹面と凸面の接触では、その同一条件下において発生応力は凹面と凸面の接触の方が小さいことが知られている。この理論を用いて実際に応力計算した結果を Table 1 に示す。伝達トルク及び歯車諸元、材質を同一にしてインボリュート歯形とロジックス歯形の接触面圧応力を (1) 式により計算した。インボリュート歯形の曲率半径は 8.3、ロジックス歯形の曲率半径は 7.4 及び 16 で、発生する面圧応力はインボリュート歯形に対してロジックス歯形は約 1/2 となった。但し、ロジックス歯形は相対曲率 0 の点が多く存在し、この点にて計算した場合、応

$$\sigma = \sqrt{\frac{F_N}{b} \cdot \frac{1}{\pi \left(\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2} \right) \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad \dots\dots (1)$$

力は 0 となるため、相対曲率 0 の点と次の相対曲率 0 の点の間点の曲率半径を用いて計算した。

2.3 すべり率

歯形のすべり是一对の歯形の接触において、その曲率半径の差によって生じると考えられる。Fig. 3 はロジックス歯形とインボリュート歯形のすべり率を比較した結果を示す。インボリュート歯形の場合には、ピッチ点は相対曲率が 0 であり、転がり接触になるためすべり率も 0 となるが、ピッチ点から歯先、歯元に噛み合いが移動するに従って、すべり率が大きくなる。特に歯元側では急激な増加傾向を示す。ロジックス歯形は歯形上の多くの点で相対曲率が 0 となるため、この点ではすべり率 0 となり、この中間点ではすべり率が大きく、すべりと転がりを繰り返す傾向となる。しかし、インボリュート歯形と比較すると大幅に改善されている。

Fig. 3 Comparison of specific sliding.

2.4 歯形の切り下げ

インボリュート歯形は、歯数が少なくなると歯元側に切り下げを生じることが知られている。これに対しロジックス歯形の場合には、ラック歯形的设计法を変えることで切り下げを生じない歯形的设计が可能である。すなわち、ラック歯形は基本的にはピッチ点に対し歯末と歯元を点対称に設計するが、各々を異なる歯形とすることが可能である。この場合、一对の歯車の作製は共役条件を満足しないため、切削加工においては二つの工具が必要となるが、粉末冶金法では、通常の場合でも大歯車と小歯車で別々の金型が必要であるため自由な歯形設計が可能である。Fig. 4 は歯形の切り

Fig. 4 Comparison of undercut condition of tooth flank.

下げを比較した例を示す。歯車諸元を同一にして歯形設計した場合、ロジックス歯形は切り下げを生じない設計が可能である。

2.5 噛み合い音

インポリュート歯車は連続した凸面の曲線で構成されるため、中心間距離の変化に鈍感で、噛み合い音は急激に大きくならないと考えられる。ロジックス歯形はピッチ点を基準に凹面と凸面の歯形となっているため、正規の中心間距離の位置から変化して組み立てると、ピッチ点付近では極端な場合に凸面や凹面同士の噛み合いになり、歯先においては断続的な噛み合いとなる事が考えられ、噛み合い音が大きくなる事が予想できる。Fig. 5は中心間距離を正規の位置から(+)方向に大きくしたときの歯先の噛み合いを示す。噛み合い率を1以上に設定しているものの、中心間距離の変化によって隙間を生じている。

Fig. 5 Irregular tooth contact.

3 特性評価結果及び考察

3.1 接触面圧疲労試験結果

動力循環試験装置によりインポリュート歯車とロジックス歯車の耐久試験を行った。Table 2は面圧疲労試験に用いた歯車諸元を示す。Fig. 6はピッチング発生限界接線力に及ぼす中心間距離変化量の影響を示す。インポリュート歯車は中心間距離を正規の位置(0mm)に組み立てた場合、接線力は200Nでピッチングが生じた。また、インポリュート歯形では中心間距離が変化しても接線力の低下は小さいと考える。一方、ロジックス歯車の接線力は中心間距離が大きくなると低下する傾向を示す。正規の中心間距離を基準として中

Table2 Gear specification.

Module	2
No. of teeth	19 21
Tooth width	10mm
Material	P/M Fe-0.7C-1.5Cu HRB 70 6.9Mg/m ³

心間距離が0.3mm大きくなるとピッチング限界接線力は約30%低下するが、インポリュート歯車に対して、約2倍と十分に大きな値である。また、正規の中心間距離の位置で面圧応力を比較するとインポリュート歯形に対してロジックス歯形は約1.8倍であり接触応力の計算結果とほぼ一致した。

3.2 スコーリング試験結果

インポリュート歯車とロジックス歯車のすべり率の違いを評価するため、歯車ポンプに組み込み耐久試験した。Table 3, 4に歯車諸元及び試験条件を示す。耐久試験に用いた作動油は摩耗の優位性を評価するために、実機ディーゼルエンジンで100~200時間の耐久試験に使用されたエンジンオイルを用いた。ディーゼルエンジンの廃油は、摩耗を促進するスス等が含まれ加速試験に適していると判断し適用した。また、耐久

Table3 Gear Specification for Contact Fatigue Test.

Tooth profile	Module	No. of teeth	Angle	Surface treatment
A. LogiX	2.5	10	20°	None HRB70
B. LogiX				Carburized/Quench HRA70
C. Involute				None HRB70
D. Involute				Carburized/Quench HRA70

Material: P/M Fe-0.7C-1.5Cu Density: 6.9Mg/m³

Table4 Test conditions.

Pressure	1MPa
Oil temp	80°C
Speed	3000r/min
Oil	Used Diesel Oil

Fig. 6 Effect of deviation of center distance on tangential force.

時間は歯車が10⁷回転したときに終了とした。試験後の歯車歯面には、歯元側及び歯末側に細かいひっかき状の傷を生じた。この引っかき傷を定量的に評価する

Table5 Surface roughness profiles at scoured area.

Sample gears	Surface roughness profile	
	Tooth flank	Tooth face
A. LogiX
B. LogiX (HT)
C. Involute	×500 ×20
D. Involute (HT)

ため歯幅方向に表面あらさを測定した。Table 5に表面あらさ曲線を示す。また、表面あらさ曲線を最大高さで評価した結果をTable 6に示す。歯車はワイヤーカット放電加工機によって作製し、試験前の歯車の表面あ

Table6 Surface roughness at scoured areas.

Tooth profile	(μm)	
	Tooth flank	Tooth face
A. LogiX	26	28
B. LogiX (HT)	18	18
C. Involute	54	56
D. Involute (HT)	26	22

らさは最大高さで、インボリュート及びロジックス歯形の焼結体は16~20μm、熱処理体で16~24μmで、ほぼ同一条件と考える。表よりインボリュート歯車の焼結体が最も大きなあらさを示し、ロジックス歯車の焼結体とインボリュート歯車の熱処理体はほぼ同等の表面あらさを示している。従って、ロジックス歯車のすべり率は小さく、従来摩耗の問題に対してインボリュート歯車で熱処理して用いていた歯車はロジックス歯形を採用することによって熱処理を省略できると考えられる。

3. 3 騒音試験結果

Table 7は歯車諸元を示す。Fig. 7は噛み合い音試験装置を示す。また、試験条件はTable 8に示す。騒音計は歯車箱から30cmの位置にセットして、中心間距離及びトルクを変化させて騒音の測定を行った。Fig. 8

Table7 Gear specification.

Tooth profile	LogiX	Involute
Module	2	
Pressure angle	8°	20°
No. of teeth	Z1=19 Z2=21	
Tooth width	10mm	
P/M Material	Fe-0.7C-1.5Cu Density: 6.9Mg/m ³

Fig. 7 Gear noise test apparatus.

Table8 Test condition.

Speed	800r/min
Torque	1N·m, 3N·m
Center distance	40±0.3mm (Check Every 0.1mm)
Background noise	71dBA

Fig. 8 Effect of deviation of center distance on tangential force.

は騒音レベルに及ぼす中心間距離変化量とトルクの影響を示す。インボリュート歯形の騒音レベルは中心間距離変化量に対してほぼ一定の特性を示し、トルクを上昇させてもこの傾向に変化はない。ロジックス歯形の騒音レベルは中心間距離変化量が±0.06mmの範囲ではインボリュート歯形と同等であるが、この範囲を超えると騒音レベルは大きくなる傾向を示す。また、トルクを変化させても同一の傾向を示す。中心間

距離変化量0.2 mm, トルク1 N・mにおいて, インボリュート歯形に比べロジックス歯形の騒音レベルは12 dBA大きい。従って, ロジックス歯形の騒音は中心間距離に対して敏感であることがわかる。インボリュート歯形と同等のロジックス歯形の騒音レベルは中心間距離変化量 ± 0.06 mm以下の範囲である。汎用性を持たせるために中心間距離変化量をモジュールの比で示すと $\pm 3\%$ となり, この範囲内であればロジックス歯形はインボリュート歯形と同等の騒音レベルとなる。

4 オイルポンプギヤの量産化

4.1 オイルポンプ用ロジックス歯車

ロジックス歯車はすべり率が小さく, 耐摩耗性に有利である。この特徴を活かし, 摩耗条件の過酷なディーゼルエンジン用オイルポンプギヤに適用して量産化した。Table 9は歯車諸元を示し, Fig. 9は量産化したロジックス歯車を示す。

Table 9 Gear specification.

Module	4
No. of teeth	8
P/M Material	Fe-Ni-Mo+HT

Fig. 9 Mass production for the diesel engine oil pump "LogiX" gear.

4.2 歯形精度測定法

歯形精度の測定法は品質管理の点から重要である。一般のインボリュート歯車は基礎円方式の歯車歯形測定機によって歯形測定する。このインボリュート歯車歯形測定機は多くの企業で導入されており, これによってロジックス歯車の歯形測定が可能であれば測定が容易であると考え検討した。しかし, ロジックス歯形は, 凹凸曲線の組み合わせであるため測定が困難で

Fig. 10 Measuring of tooth profile with three-dimensional measuring device.

あった。従って, 三次元測定機による形状測定によって行うことにした。Fig. 10は量産化したロジックス歯形の三次元測定機による測定結果を示す。本方法は, 設計座標と測定座標をコンピュータ内に取り込んで比較計算し, 誤差を算出するものである。

5 まとめ

ロジックス歯車の特性を評価した結果, 次のような結論を得た。

- (1) ロジックス歯形の接触面圧応力は同一条件下においてインボリュート歯車の約 $1/2$ であることを計算と疲労試験の結果から確認した。
- (2) ロジックス歯形のすべり率はインボリュート歯形に比べて小さく, 熱処理を省略できる可能性を有する。
- (3) ロジックス歯形の騒音をインボリュート歯形と同等にするためには, 中心間距離精度を $\pm 3\%$ 以内にする必要がある。

以上の結果に基づき, 従来溶製材で作製されていた高回転ディーゼルエンジン用オイルポンプギヤを焼結化することができた。

文 献

- 1) 長田重慶, 小守勉, 五十嵐文雄: 精密工学会, 114 (1987)
- 2) 菖蒲次憲, 山田淳一: PM' 93 京都 第六回開発事例報告 (1993)
- 3) J. Yamada, T. Shobu: SAE Tech. Paper 960276 (1996)