112 かみあい進行方向に着目したはすば歯車の歯面設計および評価法の検討

A Study on Design and Evaluation of Tooth Surface Modifications along Path of Contact

○ 汾陽 光浩 (トヨタ自動車) 正 林田 泰 (トヨタ自動車)
 正 上田 泰史 (トヨタ自動車)
 岡部 勝彦 (トヨタコミュニケーションシステム)

Mitsuhiro Kawaminami

Drivetrain Engineering Div. 1, Toyota Motor Corporation
1, Toyota-cho, Toyota, Aichi

Yasushi Hayashida

Drivetrain Engineering Div. 1, Toyota Motor Corporation

Yasushi Ueda

Drivetrain Engineering Div. 1, Toyota Motor Corporation

Katsuhiko Okabe

Toyota Communication Systems Co., Ltd.

This report shows that tooth surface shape along path of contact is closely related to gear whine noise. Designing tooth surface shape along path of contact can reach an appropriate tooth surface shape to reduce gear whine noise. Especially, crowning along path of contact is one of the most important factors to design tooth surface shape. In addition, this report shows an evaluation method of tooth surface shape on plane of action and along path of contact, and some important factors of tooth surface shape that are closely related to gear whine noise.

Key Words: Helical Gear, Tooth Surface Shape, Path of Contact, Gear Whine Noise

1. 緒言

自動車の静粛化に伴い、自動車用歯車装置のギャノイズ性能に対する要求は加速する一方である。ギャノイズ低減の検討は、振動伝達系と強制力の両面から進められているが、前者の一般解は未だ少なく、根本的な対策は強制力の低減に頼っているのが現状である。ギャノイズの強制力としては、かみあい伝達誤差が広く適用されており⁽¹⁾⁽²⁾、かみあい伝達誤差の大きさを左右する要因の一つに、ミクロン・オーダーの歯面形状がある。従来、はすば歯車の歯面形状を表現する上で、歯形・歯すじ方向の形状が広く用いられているが、かみあい伝達誤差との対応が悪いという課題がある。これに対して、作用平面上で歯車のかみあいが進んでいく方向(以下、かみあい進行方向と呼ぶ)の形状について検討し、かみあい進行方向の形状とかみあい伝達誤差との相関が高いことが示されている⁽³⁾⁽⁴⁾。本報では、歯形・歯すじ方向の形状とかみあい進行方向の形状の関係を明確に示し、かみあい進行方向の形状設計での歯車装置の振動・騒音の検討事例を示した。また、通常の歯形・歯すじ方向の歯面形状測定では表現が困難なかみあい進行方向の形状の評価法を確立し、実際の量産歯車でのかみあい伝達誤差との対応を調査することによって、かみあい伝達誤差と対応の良い歯面形状因子を特定した。

2. かみあい進行方向形状の歯面設計

2. 1 歯形・歯すじ形状とかみあい進行方向形状の関係

かみあい進行方向は、与える歯面形状により、任意の角度に設定することができ、かみあい進行方向と歯すじ方向がなす角度を θ と定義する。(Fig.1)

Fig.1 Path of Contact on Plane of Action of Helical Gear

作用平面の大きさに対して、与えられる歯面形状の修正量は十分に小さく、丸み形状を円弧形状、放物線形状のいずれにて定義をしても大差なく、放物線形状にて定義すると、歯形・歯すじ方向の形状と、かみあい進行方向の形状の関係は式(1)にて示される。式(1)より、従来の歯形・歯すじ方向の形状のうち、歯形丸み、クラウニング、バイアスの3つの形状因子にて、かみあい進行方向の角度、およびかみあい進行方向の丸みが決定されることが分かる。なお、式(1)中のかみあい進行方向、同時接触線方向の丸み量は、放物線の2次項の係数を意味しており、実際の形状指示においては、Fig.2に示すような理想インボリュート曲線からの飛出し量で示される。

$$\theta = \text{ArcTan} \left[\frac{h \cdot (-8 \cdot h \cdot e_L + w \cdot \tan \beta_b \cdot e_B)}{w \cdot (-8 \cdot w \cdot \tan \beta_b \cdot e_P + h \cdot e_B)} \right]$$

$$e_{PC} = \frac{e_B^2 - 64 \cdot e_L \cdot e_P}{16 \cdot (-4 \cdot h^2 \cdot e_L - 4 \cdot w^2 \cdot \tan^2 \beta_b \cdot e_P + h \cdot w \cdot \tan \beta_b \cdot e_B)}$$

$$e_{CL} = \frac{e_L}{w^2} - \frac{\tan \beta_b \cdot e_B}{4 \cdot h \cdot w} + \frac{\tan^2 \beta_b \cdot e_P}{h^2}$$

... (1)

ここで、 e_{PC} : かみあい進行方向丸み
 e_{CL} : 同時接触線方向丸み
 e_L : 歯すじ方向クラウニング
 e_P : 歯形丸み
 e_B : バイアス
 $2w$: 歯幅
 $2h$: 作用線長さ
 β_b : 基礎円筒上ねじれ角

Fig.2 Crowning along Path of Contact

従来の歯面設計の中で、バイアスを含めた歯形・歯すじ方向の形状にて設計をする際、様々な組み合わせの検討を要したのは、かみあい進行方向の形状が、これら3つの形状因子により決定されていることが大きな要因となる。

また逆に、かみあい進行方向丸み、同時接触線丸み、かみあい進行方向角度が決定されれば、歯形丸み、クラウニング、バイアスが決定されることとなり、従来の形状を管理して構成されたデータベースを有効に使うことが出来る。

2. 2 かみあい進行方向角度の影響

かみあい進行方向の形状を決定する上で、まず、作用平面上でかみあい進行方向がなす角度 (θ) を決定することが必要である。今回、 θ の水準として、実際の自動車用歯車での適用を考慮し、以下の2水準にて検討する。

①作用平面の対角線方向

②同時接触線に直交する方向

また、かみあい進行方向の形状について、それぞれ、かみあい進行方向の丸みを3水準 (I大・II中・III小) にて検討した。このとき、同時接触線方向の丸みは、全ての水準について同一とした。適用した歯車装置を Fig.3、歯車諸元を Table.1、かみあい進行方向の形状と、歯形・歯すじ方向の形状の関係を、Table.2 に示す。なお、バイアスについては、この場合負の値が大きいほどバイアスイン傾向が強くなる。実際に製作・計測された歯面形状の一例を Fig.4 に示す。製作された歯車には、歯研仕上げを施している。

Fig.3 Test Gear Box

Table.1 Gear Dimensions

	Drive	Driven
Normal module	2.03	
Number of teeth	53	53
Center distance (mm)	120.0	
Normal pressure angle (degree)	16.5	
Helix angle (degree)	26.0	
Face width (mm)	20.0	20.0
Total contact ratio	3.4	

Table.2 Composite Tooth Surface Modification

θ	e_{PC}		e_{CL}	Profile & Lead		
				e_P	e_L	e_B
① 35.2°	I	25	12	22	7	28
	II	12		14	5	-4
	III	5		9	4	-22
② 65.1°	I	25		17	10	41
	II	12		9	8	10
	III	5		4	7	-9

(μm)

Fig.4 Tooth Surface Shape (Measured)

Fig.3 に示すテストボックスを用い、Table.2 に示す歯面形状を持つ各歯車対のかみあい伝達誤差の実測結果を Fig.5 に示す。かみあい伝達誤差の測定には、おもり釣り合い式の準静的な負荷かみあい伝達誤差試験機⁽⁶⁾を用いた。

かみあい進行方向がなす角度の違いに関わらず、かみあい進行方向の形状により、かみあい伝達誤差のレベルが決定されることが明確になった。また、かみあい進行方向の丸みが小さいほどかみあい伝達誤差のレベルは小さくなる。ミスアライメントや歯面公差を考慮した片当たりの生じない最小のかみあい進行方向の丸みを設計することにより、かみあい伝達誤差を小さくすることができると考えられる。

Fig.5 Measured Transmission Error

同じテストボックスを用い、放射音を測定した結果を Fig.6 に示す。また、かみあい伝達誤差と、ケース表面上の振動との関係を Fig.7 に示す。かみあい伝達誤差と放射音、振動の相関は高く、上述と同様に、かみあい進行方向がなす角度の影響は小さく、かみあい進行方向の丸みが小さいほど、放射音、振動のレベルは小さくなる。

かみあい伝達誤差はギヤボックスの振動、および放射音と高い相関を示し、かみあい進行方向の形状の設計により、ギヤノイズに着目した設計が出来ることを示した。

Fig.6 Sound Pressure Level

Fig.7 Correlation between Transmission Error and Vibration on Housing

3. かみあい進行方向に着目した評価法

3. 1 理想形状からの乖離量の影響

自動車用変速機の歯車のように短時間で大量の生産を求められる歯車対については、歯面設計時に想定している歯面形状(以下、モデル歯面)と実際に生産している歯面形状とでは、丸み、傾きといった形状因子の定量値が同じでも性能が異なる場合が多く見られる。Fig.8 に示す両歯面は、(a)がモデル歯面、(b)が実際に量産された歯面の一例である。(a)、(b)は、歯形・歯すじ方向の精度項目については、同等の定量値を示すが、かみあい伝達誤差の大きさには差異が生じる (Fig.9)。Fig.10 に、(a)、(b)のかみあい進行方向の形状を示す。実際に製造された歯面(b)はモデル歯面(a)に対して形状のずれが発生し、この乖離量は、かみあい伝達誤差に影響を与える因子として無視できないことが分かる。

(a)Designed (b)Measured
Fig.8 Tooth Surface Shape

Fig.9 Transmission Error

Fig.10 Tooth Surface Shape along Path of Contact

3. 2 かみあい進行方向断面特性による歯面の評価

歯面形状の評価に対して、歯面を3次元的に面で評価しようという試みがなされている。しかし、3次元形状でギヤノイズの良・悪の判断はある程度可能となるがあくまで官能評価にすぎず、定量値による評価が必要となる。そこで、歯面の3次元評価から、かみあい進行方向を決定し、この方向での歯面形状の定量評価を試みた。対象歯車対は、FF-ATのカウンタギヤで、諸元をTable.3に示す。また、評価指標は、かみあい進行方向の丸み量に加え Fig.11 に示すように、かみあい進行方向の傾き量、3.1 で述べたモデル形状からの乖離量の代表値をかみあい進行方向形状のうねり量(以下、うねり量)として定義し、この3項目で整理した。

Table.3 Gear Dimensions

	Drive	Driven
Normal module	2.37	
Number of teeth	52	57
Center distance (mm)	157.0	
Normal pressure angle (degree)	15.0	
Helix angle (degree)	34.5	
Face width (mm)	22.0	22.0
Total contact ratio	3.99

Fig.11 Index of Tooth Surface Shape along Path of Contact

Fig.12 に検討結果を示す。(a)は、かみあい進行方向のうねり量が小さい歯面について、かみあい進行方向の丸み量および傾き量とかみあい伝達誤差の関係を示したもので、(b)は、うねり量が大きいものについてのそれを示したものである。Fig.13 は、かみあい進行方向のうねり量大小の代表例である。かみあい進行方向のうねり量の大きさで層別することにより、かみあい伝達誤差のレベルがかみあい進行方向の丸み量と傾き量で整理でき、かみあい進行方向の丸み量と傾き量の最適値を求めることが可能となる。かみあい進行方向の丸み量については、前項で述べたように、小さいほどかみあい伝達誤差が小さくなる傾向を示す。また、かみあい

4. 結言

自動車用歯車装置のギヤノイズに影響を及ぼす歯面形状について、かみあい進行方向の形状に着目した検討を行い以下の結果を得た。

- (1)従来の歯形・歯すじ方向の形状とかみあい進行方向の形状の関係を明確にした。
- (2)かみあい進行方向の形状とかみあい伝達誤差、かみあい伝達誤差とギヤノイズは高い相関性があり、ギヤノイズの性能設計に対して、かみあい進行方向の形状設計は有効な手法であることを実機で確認した。
- (3)かみあい伝達誤差に対するかみあい進行方向がなす角度の影響は小さい。
- (4)自動車用量産歯車に対して、かみあい進行方向の形状特性(丸み量、傾き量、うねり量)を新しく定義することで、歯面とかみあい伝達誤差の関係を評価できることを確認した。

参考文献

- (1) A. KUBO and K. UMEZAWA, *Trans. JSME*(3), 43-371, (1977), 2771-2779
- (2) K.YOSHIKAWA, H.TANI, I.TARUTANI, A. SUZUKI, H.MAKI and Y.UEDA, "Measurement of helical gear transmission error and improvement of analytical method", *Trans. JSME(C)*, 63-609, (1997), 1775-1782
- (3) H.MAKI, "A study on definitions of tooth modifications of helical gears relevant to gear noise", *MPT2001-Fukuoka*, Vol.1, (2001), 57-62
- (4) Y.UEDA and D. R. HOUSER, "Optimum design and manufacturing robustness for gear whine of helical gear", *VDI-Berichte*, 1665, (2002), 839-851
- (5) H.MAKI, T.IDO, A.SUZUKI, M.UMEYAMA, *MPT'94*, No.940-58, (1994-12), 145

Fig.12 Effect of Tooth Surface Shape on Transmission Error
(at average of 0,30,60,90,120Nm)

Fig.13 Examples of Tooth Surface Shape
along Path of Contact

進行方向の傾き量については、大きいほどかみあい伝達誤差が大きくなる傾向を示している。これは、かみあい始め・終りの歯当たりが強くなるとかみあい伝達誤差が悪化することを示していると考えられる。また、かみあい進行方向のうねり量が大きくなるとかみあい伝達誤差が全領域で悪化し、かみあい伝達誤差に対する丸み量の感度も変化することが分かる。