微小モジュール歯車の歯面トポグラフィ計測 —歯科用印象材を用いた非破壊測定—

Tooth flank topography measurement of small module gear
- Nondestructive measurement using dental impression material -

正 黒河周平 (九大) ○学 矢野泰隆 (九大院)

Syuhei KUROKAWA, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, Japan
Yasutaka YANO, Kyushu University

1. 緒言

近年、精密機器の小型化に伴い、機械構成要素の小型化と高精度化が求められている。例えばプリンタは小型化が進んでいるが、同時に印刷精度の向上も求められている。印刷精度に大きく関与している機械要素として用紙送りや印刷ヘッドの動作制御要素があるが、これらには微小モジュール歯車（モジュール ≤ 1 ）が用いられつつある。しかし、微小モジュール歯車の伝達精度不足から機械要素に動作不良が起り、印刷結果に印刷ずれ・色むらが発生し、問題となっている。微小モジュール歯車の精度不足の原因として加工誤差がある。歯車はモジュールが小さくなるにつれ歯車の歯たけ・歯みぞが小さくなり加工が困難になっていくため、歯たけの大きさに比べ歯車の歯形・歯すじ誤差など加工誤差が相対的に大きくなる。よって、動作不良を抑えるには加工誤差を捉えることが重要であるが、現在、微小モジュール歯車の加工誤差は測定できていない。なぜなら、加工精度を測定する場合、既存の歯車形状測定機などの精度計測では触針子が歯みぞに入らない、光を利用した非接触測定においても歯が光を遮る、などの問題があり、歯面形状を詳細に測定することができないからである。そのため歯面形状測定を行うためには歯を切断するしかないが、非実用的である。そこで、微小モジュール歯車の歯面形状を非破壊で捉える方法として、表面形状の高精度な転写性が確認されている¹⁾ 歯科用印象材を用いて歯車の型を採り、型の歯面を触針式の表面形状測定装置で測定することで歯面トポグラフィを得る方法を提案する。測定結果と歯面観察より、測定方法の妥当性および問題点を検討する。

2. 測定方法

2-1 表面型採取用印象材 歯車の型を採る材料として、歯科で口腔内の印象採取用として使用されている、シリコン系のポリビニルシロキサンを主成分とするインジェクションタイプの歯科用ゴム質弾性印象材を用いた。この印象材は付加形で反応中に抜ける成分がないため寸法精度がよく、また印象された型の表面が緻密であるため詳細なトポグラフィを得ることが期待できる。

2-2 表面形状測定装置 フルクロードループ制御を行い高精度な位置決め動作が可能な高分解能 XY テーブルユニット（シグマ光機製 Mark-204MS）と三次元表面粗さ測定機（小坂研究所製 SE-30K）を組み合わせることで表面形状測定装置を構成した。XY テーブルユニットの諸元を表 1 に示す。XY テーブルは一軸の X テーブル、Y テーブルを重ねることで構成されている。XY テーブルユニットはパーソナルコンピュータと RS-232C インターフェイスで接続されており、XY テーブルが等間隔にステップ動作し、停止時に XY テーブルの現在位置と粗さ測定機の読みを取得することで表面形状を測定できる。

2-3 測定手順 印象材を用いて測定対象歯車の歯面の型を採り対象歯面の型を切り出し、その型を XY テーブルに粘土を用いて歯面がほぼ水平となるように設置する。そのため、歯面の圧力角・

Table 1 Specification of XY table unit

Positioning accuracy	7 μm
Repeatability	3 μm
Lost motion	3 μm
X axis straightness	5 μm
Y axis straightness	5 μm
Ball screw diameter and lead	$\phi 6\text{mm}$, 1mm lead
Motor	Stepping motor
Resolution	50nm

ねじれは測定できない。測定は型の歯面上を歯すじ方向に測定することで測定対象の歯面形状を得る。

2-4 測定精度確認 本研究で使用した XY テーブルは繰り返し性や真直度が良いとはいえず、測定結果を評価するに当たり XY テーブルの誤差許容範囲を見積もる必要がある。ここでは、同一形状を繰返し測定することで測定装置の繰返し測定精度を見積もった。測定装置の繰返し性を確認するため、XY テーブル表面を繰返し測定した結果を図 1(a)に示す。高さ方向に約 2 μm の誤差が発生することがわかった。次に、印象材表面においても同様に測定を行った結果を図 1(b)に示す。測定開始直後に高さが大きく変化している様子が観察できる。そこで、測定開始位置を X 方向に 100 μm 移動させ、同一形状を測定したところ、同じく測定開始直後は高さが大きく変化していることが見られた。これは印象材がゴム質弾性体であることが影響していると推測されることから、印象材を接触式測定機で測定する場合、測定開始直後約 30 μm のデータは歯面トポグラフィデータから除外することにした。

Fig. 1 Repeated measurement

3. 測定対象歯車

測定対象歯車には、微小モジュール歯車として市販されているプラスチック製射出成形平歯車と、実際に熱転写方式カラープリンタ内部で使用されていた金属製切削加工平歯車を用いた。それらの基本諸元を表 2 に示す。プラスチック製歯車はカタログ値を元に、金属製歯車は形状の実測値を元に示している。そのため金属製歯車の諸元は推定値であり、正確性には欠ける。

Table 2 Specification of plastic and metal spur gear

	Plastic gear	Metal gear
Module	0.8	0.4
Number of teeth	16	13
Pitch circle diameter [mm]	12.8	5.2
Tip circle diameter [mm]	14.4	6.0
Normal pressure angle [°]	20.0	20.0
Face width [mm]	4.0	4.0

4. 歯面トポグラフィ測定結果

4-1 歯面トポグラフィ計測 プラスチック製歯車から採取した型を 50 μm サンプルング間隔で測定した歯面トポグラフィ計測結果を図 2(a)に示す。またトポグラフィを詳細に得るため歯面の中央部 500 μm $\times$ 500 μm を 10 μm サンプルング間隔で測定した結果を図 2(b)に示す。歯元から歯先にかけて測定対象歯車の実歯面と同様なインボリュート曲面を描いている様子が観察できる。また表面には波を打った 30~50 μm 間隔のうねりが確認できた。

金属製歯車から採取した型を 50 μm サンプルング間隔で測定した歯面トポグラフィ計測結果を図 3(a)に示す。また図 3(a)を高さに 10 倍に拡大した結果を図 3(b)に示す。プラスチック歯車と同様にインボリュート曲面を描いている。また、表面には歯すじ方向に約 800 μm 間隔で高さ約 3 μm のうねり形状が 4~5 山ほど見られた。図 4 に金属製歯車をマイクロスコップで観察した画像を示す。表面には切削加工時の送りマークが 4~5 山ほど見られた。これは測定結果のうねりに一致する。よって、本研究での測定方法は切削加工歯車の加工精度を確認できるレベルにあることがわかる。モジュールが小さくなるにつれ切削加工歯車の加工誤差がモジュールに比べて相対的に大きくなっていることを確認できた。

4-2 SEM 観察 プラスチック製歯車の表面にトポグラフィ計測で検出したうねりが実際に存在しているかどうかを確認するために走査電子顕微鏡(SEM)を用いてプラスチック製歯車表面とプラスチック製歯車から採取した型の表面を観察した。図 5(a)にプラスチック製歯車表面を示す。図 5(b)にプラスチック製歯車から採取した型表面を示す。両者に図 2(b)に表れているような 30~50 μm 間隔のうねり形状が観察できる。これより、印象が十分な精度で行われており、印象材の転写性の高さがわかる。また、プラスチック製歯車の表面は切削加工歯車とは異なるうねりを持った表面トポグラフィを有していることがわかる。

5. 歯形誤差の算出

測定で得られた歯面形状は歯の形を三次元的に表したものである。一方、通常の歯面測定の評価では幾何学インボリュート曲線を持つ理想的な歯面形状からの差である歯形・歯すじ誤差を用いる。本研究の測定方法ではインボリュート曲線の位置を示す手がかりは測定形状と歯車諸元しかない。そこで歯形誤差を求めるために測定された曲面に幾何学インボリュート曲線をフィットさせ、両者の差を計算し、歯形誤差として求めた。歯形誤差の算出結果を図 6 に示す。歯形誤差は 3 μm ほどである。しかし、測定の繰り返し性が約 2 μm の精度であることを考慮すると、本研究で用いた表面形状測定装置では、微小モジュール歯車の歯形誤差をこれ以上の精度で議論できず、より高精度な測定装置が必要である。また、測定方法と歯形誤差の算出方法に仮定が有り、正確さに欠ける。現状の測定方法では回転軸や基礎円を基準として測定できていないため、圧力角誤差やねじれ角誤差が求められない。表面トポグラフィのみの計測しかできないため、圧力角誤差やねじれ角誤差は別の測定を用いる必要がある。また、歯先形状が正確に測定できない。歯先は急な段差になっているため既存の接触子では先端まで測定できないことが理由である。

6. 結 言

歯科用印象剤を用いて、微小モジュール歯車の歯面トポグラフィ非破壊計測を行った。

- (1) 歯科用印象材と表面形状測定装置を用いることで、高さ方向が約 2 μm の精度で非破壊での歯面トポグラフィ計

Fig. 2 Measured tooth flank topography of plastic gear

Fig. 3 Measured tooth flank topography of metal gear

Fig. 4 Microscope image of metal gear

Fig. 5 SEM image of tooth surface

Fig. 6 Fitting of tooth profile measuring points and involute curve

測が可能である。

- (2) トポグラフィ詳細測定結果と SEM 画像より、シリコン系インジェクションタイプ歯科用印象材の十分な転写性が確認できた。
- (3) プラスチック製微小モジュール歯車の表面には 30~50 μm 間隔のうねりが存在している。
- (4) 切削加工微小モジュール歯車の送りマークが確認できた。
- (5) 微小モジュール歯車の回転軸や基礎円が基準となるような測定方法の工夫を行い、圧力角誤差やねじれ角誤差を測定できるようにする必要がある。

参考文献

- (1) Joanna Verran, Deborah L. Rowe, Robert D. Boyd, "Visualization and measurement of nanometer dimension surface features using dental impression materials and atomic force microscopy", International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 51, Issue 3, April 2003, pp.221-228.