微小モジュール歯車の歯形精度測定への 光切断法の応用（第2報）*

—— 歯形誤差の測定 ——

松岡 浩 仁** 賀 勢 晋 司** 伊 東 達 也***

Application of Optical Cutting Method to Measurement of Tooth-Profile Error of Minute Module Gears (2nd Report)

— Measurements of Total Profile Error —

Hirohito MATSUOKA, Shinji KASEI and Tatsuya ITOH

Basing on the optical cutting technique, this study aims to develop an accuracy measurement method of tooth profile for minute module gears. This report, as a sequel of the previous report which made possibility of this method clear, deals with subjects with regards to a practical step to actual tooth profile measurements. The object to be measured is a range except tip and root portions of tooth surfaces of a hob-cut spur gear with 0.2 module which is considered to be in measurement limit in using a touch probe type instrument. Profile errors are acquired in comparison between fine-lined image data of tooth surface filtered through a low pass filter to eliminate influences of surface roughness and so on and the theoretical tooth curve. It is ascertained that adequate measurement results in accuracy of micro meter level can be attained. However, for further development, it is necessary to find solutions for the following problems, namely influences of surface roughness to the image data and use of the polarized light technique.

Key words: minute module gear, optical cutting method, tooth profile, fine-lined image, low pass filter

1. 緒 言

産業用ロボットの小型化、高精度化が進む中で、動力、運動伝達要素としての歯車も多様化し、モジュールが 0.2 以下という、非常に小さな歯形を持つ物も多用されている。歯形が小さくなると現在主に用いられている接触式測定では対応できない。筆者らは微小モジュール歯車を対象とした、光応用非接触歯形測定方法の開発を行っている。これまでに、CD プレーヤなどで用いられている光ピックアップを利用して、円ピッチ精度測定を実現した¹⁾。続いて、光切断法により歯形画像を取得し、適切な処理を加えた画像を用いて、数 μm の精度での歯形形状誤差測定が可能であることを示した²⁾。しかし、この場合、歯先部の画像を基準として理論的な歯形を計算し、それからの偏差を誤差と定義しているために、歯先部分の撮像の不確かさがそのまま測定結果に現れてしまう。より実用的な測定器とするためには、確実な測定基準をとることが必要であると考えられる。そこで、測定基準を明確にし、直接誤差評価を行えるように装置及び測定アルゴリズムに改良を加えた。また、歯形誤差を一種の表面うねりであると考え、得られた歯形データを低域通過フィルタを通すことで、表面粗さなどに起因すると思われる、歯形誤差線図中の高周波成分の除去を行った。本報では、実際にモジュール 0.2 の標準歯車について行った、歯形誤差

の測定結果について、フィルタの設計も合わせて報告する。本測定方法によれば、同時に一歯について、歯厚も含めて左右両歯面の歯形誤差測定が可能であり、迅速な測定にも貢献できるものと考えられる。

2. 測 定 原 理

2.1 光切断法

光切断法は、表面粗さを始め、微小形状の測定に用いられる、光学的な非接触測定方法である³⁾。歯形測定に応用した場合の基本的な考え方を図 1 に示す。この例は投射角、観察角ともに 45° の明視野観察の場合で、本測定でもこの明視野観察を行っている。このような場合、被測定歯形は歯たけ方向におよそ

Fig. 1 Image of tooth cutting

* 原稿受付 平成9年12月24日

** 正 会 員 信州大学工学部（長野市若里 500）

*** 学生会員 信州大学大学院

Fig. 2 Setting of measurement coordinate

$\sqrt{2}$ 倍されて観察される。その測定結果を、コンピュータを用いて適切に補正し、歯形を再現する。光切断法は本来あまり大きな凹凸の測定には不向きであるが、本測定で対象としている歯車の歯たけはせいぜい 0.4mm 程度であり、十分に適用できると考える。

2.2 測定座標系の設定

前報では、測定された歯面上の点と歯車中心との相対的な位置関係が不明確であることから、撮影で得られた歯先部分の画像を基準に理論的な歯形を計算により求めて、そこからの偏差を誤差と定義した。しかし、歯先部分の撮像の不安定さがそのまま測定誤差につながることになるため、測定器の中に明確な基準を設ける必要があると考えられる。そこで、表 1 に示すような、その半径が既知である基準円筒を用いて測定基準を設定し、それを用いて歯たけ方向についての測定座標を設定することとした。図 2 にその様子を示す。(a)の $x-y$ は原点が歯車中心軸上にあり、 y 軸が測定系の光軸面と平行、 x 軸がそれと直角となる物体座標系で、(b)の $X-Y$ は CCD 面上に設定した測定座標系である。図のように半径 R の基準円筒を撮影し、細線化処理した像が Y_R の位置にあるときその点を物体座標系の R と対応させて二つの座標系の整合をとる。これに対し、 X 軸方向については、現段階では定量的な位置決めはできていない。そこで、測定の際に画面上に測定基準位置となるように理論的な歯形の歯面位置を示すマークを表示させ、そこに重ねるように位置決めして歯形の光切断像を撮影し、データの処理時に左右の歯面データの平均を取って、 X 軸方向の基準位置としている。このように、まだ X 軸方向に曖昧さが残る。この影響は歯形のゆがみとして現れることが考えられる。

Table 1 Main specifications of reference cylinder

Diameter	38.374mm
Surface roughness	0.8s
Circular run-out	1 μ m

2.3 低域通過フィルタ

本測定方法は非接触であるために、被測定部表面の微妙な状態が測定結果に大きな影響を及ぼす。そのような因子としては、表面粗さそのものや、それに伴う乱反射光成分などがある。そ

してこれらを歯形誤差成分と分離することはできないと考えられる。そこで、歯形誤差を一種の表面うねりと考えフィルタを通して取り除いた。そのフィルタの設計に際しては表面うねりに関する JIS B 0610 を参考にして、被測定歯車の歯たけがおよそ 0.4mm であることから、測定長さが 0.4mm、高域カットオフ長さは 0.08mm、そして高域での減衰率を -12dB/oct とした。設計したフィルタは 2 次のバターースフィルタで、その伝達関数を式 (1) に示す。

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2s\omega_c + \omega_c^2} \quad (1)$$

ここで ω_c は遮断空間角周波数である⁴⁾。この伝達関数に Z 変換を施してデジタルフィルタを構成した。

比較的高周波の成分はこのような低域通過フィルタによりかなり取り除けるものと考えられる。しかし、フィルタリングによっては本来の歯形そのものの形状が変わってしまうおそれがあることから、測定長さやカットオフ長さなど、フィルタの設計に対しては一定の基準を設ける必要があると思われる。

Fig. 3 Measuring apparatus

3. 測定装置

3.1 測定装置

図3に測定装置の概要を示す。投光系、受光系ともに市販の顕微鏡筒を利用している。光源にはタングステンランプを用い、幅 0.1mm のスリットを通して帯状にした光を、5 倍の対物レンズにより絞り、被測定歯車に照射する。歯車上に生じた光切断像を 5 倍の対物レンズ及び 1/3"CCD カメラ (768pixel × 494pixel) を用いて観察する。被測定歯車はマンドレルを通しセンタ支持台に取り付け、xyz ステージ上に設置する。また、測定系も xy ステージ上に設置し、アライメントの調整を可能にしている。そして、CCD カメラで得られた像は画像処理ボード上で2 値化した後パソコンに取り込む。なお、測定分解能は校正の結果、歯たけ方向に $1.15 \mu\text{m}$ 、歯厚方向に $1.63 \mu\text{m}$ である。

4. 測定方法および測定対象

4.1 測定方法およびデータ処理

測定に当たっては、はじめに基準円筒をセットする。そしてその光切断像が測定画面上の適切な位置にくるように測定テーブルの位置決めをして基準円筒の光切断像の撮像を行う。続いて被測定歯車をセットして、その歯形像が測定画面上に表示される基準位置に合うように位置決めし、撮像する。測定箇所はほぼ 90° ごとに4 か所とする。この4 点について数回ずつの撮像が終了した後再び基準円筒をセットし直し、その光切断像を記録しておく。このとき最初に基準円筒で設定したテーブルの位置は動かさないものとする。そして歯車測定前後の基準円筒の撮像記録を解析し y 軸方向の位置を確定する。

次に細線化処理を行った各歯形データから歯形誤差計算を行う。このときはじめに、前述のとおり左右の歯面位置の平均から x 軸方向の位置を決定する。そして、y 軸方向に測定点をとっていった、その y 座標に対応する理論的な歯形の x 座標を計算し、両者の偏差を求める。

4.2 測定対象

測定対象とした歯車の諸元を表2に示す。すべてホブ切り標準平歯車で、歯車 1 は市販されているもので歯面を研削仕上げしてある。また、2 および 3 は新たに製作したもので、歯面の仕上げ、修正は施していない。

なお、測定項目としては図4に示すような、全歯形誤差 E_t 、歯形形状誤差 E_p 、そして圧力角誤差 θ と、ピッチ円上での歯厚を取り上げる。ここで、 E_t は検査範囲 L における円周方向の最大偏差幅を意味し、 E_p は圧力角誤差直線の周りの円周方向についての最大偏差幅である。このほかの測定項目として、歯筋誤差については歯車または測定器を歯車の軸方向に適切な間隔を持ってスライドさせながら測定することで、また、ピッチ誤差や歯溝のふれについては、被測定歯車の割出し機構を追加し、ピッチ円上での誤差を追跡することで対処できる。

5. 測定結果及び考察

図5に観察された光切断像と細線化像の例を示す。細線化は歯面、歯先ともにそれぞれの像の中心を基準に行っている。この細線化データを用いて誤差測定を行った。

図6にフィルタの効果を示す。歯車 1 のある歯の左歯面のデ

Table 2 Gears to be measured

Gear No.	1	2	3
Module	0.2		
Number of teeth	190		
pressure angle	20		
Tip circle diameter mm	38.369	38.352	38.355

Fig.4 Profile errors of tooth

Fig. 5 Example of optical cutting image

Fig. 6 Effect of filtering

ータに対してローパスフィルタを通していない場合を破線で、フィルタを通したものを実線で示す。フィルタを通さない場合、ピクセル化の際に生じる ± 0.5 ピクセルの誤差や、表面粗さとそれに伴って生じる乱反射光に起因すると思われる比較的高い周波数成分が観察されている。それに対し、フィルタを通すこ

とでそれらの成分は抑えられ、低い成分のみを取り出すことができる。

次に、図 7(a)～(c)に、モジュールとピッチ円直径を用いて計算した理論歯形からの偏差測定例を示す。いずれも、横軸に歯車中心からの距離を、縦軸に理論歯形からの偏差をとっている。また、左右両歯面ともに歯厚の大きくなる方向を正としている。なお(a)～(c)はそれぞれ歯車 1～3 に対応する。そして(d)および(e)は(c)から求めた歯形誤差測定例で、それぞれ左歯面、右歯面である。

図 7 から得た歯形誤差について表 3 にまとめる。表中下段は接触式測定器（大阪精密機械社製）による測定結果である。

表 3 によると、歯形形状誤差については接触式測定の結果と比較して分解能程度の差で得られており、妥当なものであると考えられる。これに対し、圧力角誤差については、接触式の測定結果と比較して多少ばらついた印象を受ける。測定の際、測定ステージを動かしたり、固定のためのクランプを締め付けたりすると歯車の姿勢が変わってしまうことがあることが確かめ

られている。そのような、測定装置としての剛性の不足がこのような結果に現れているものと思われる。

Table 3 Experimental results

Gear No.	μm					
	1		2		3	
Flank	L	R	L	R	L	R
Profile error	1.7	2.4	2.6	1.5	2.3	3.2
	1	2.5	2	2	2	3
Form deviation error	1.5	1.9	2.6	1.5	1.7	2.5
	1	1	1	2	2	2
Pressure angle error	0.5	0	-0.1	-2.4	-0.6	-0.6
	-2	0	-1	0	0	-1
Tooth thickness	324		308		306	

Upper: Experimental results

Lower: Measured by touch probe type instrument

L : left flank, R : right flank

(a) Form deviation example of gear No. 1

(b) Form deviation example of gear No. 2

(c) Form deviation example of gear No. 3

(d) Example of profile error (left flank)

(e) Example of profile error (right flank)

Fig. 7 Experimental results

次に歯厚であるが、1と2および3との間に大きな開きがある。現在のところ比較できるデータがないので正確なところは不明である。しかしながら、同時に製作された歯車2と3がほぼ同じ歯厚を持つ結果が得られていることから、3つの歯車の相対的な大きさの違いは的確に捉えられているものと思われる。歯の大きさそのものはよく反映しているものと考えられる。

表4は一つの歯についての5回の繰返し測定の結果例で、測定をするたびに歯車を1回転させながら繰返ししたものである。このように、誤差の大きさと分解能とが接近していることもあるが、繰返し測定での大きなばらつきは見られない。

本方法での測定誤差には、測定器各部のアラインメントの狂いが大きな影響を及ぼすと考えられる。前述した被測定歯車の傾きの他、投光系でのスリットの取付け角度誤差も切断角度の誤差を生じ、結果として得られる歯形にゆがみをもたらす。また、CCDカメラの光軸周りの回転を伴う取付け誤差は歯形誤差、圧力角誤差の形で現れる。このほかの誤差要因としては光源の光強度のばらつきがあげられる。現在のところタングステンランプを用いているが、この場合光の強さが一様ではなく、反射光に強度的な偏りが生じて、光切断像の不均一な切断面をもたらす。図7において、フィルタで取り除けていない比較的低周波成分の誤差が見られるが、この誤差成分の中には、光切断像の解析から、そのような光強度のばらつきが影響しているものもあると考えられる。

Table 4 Repetitive measuring results

μm		
Measurement No.	Profile error	Mean value
1	1.76	1.75
2	1.92	
3	1.56	
4	1.86	
5	1.67	

6. 今後の課題

基準円筒を用いることで歯車の半径方向の座標は決定できたが、円周方向位置の決定や被測定歯車の角度割出しにはまだ曖昧さが残っている。これらは光切断像のゆがみをもたらす、測定誤差の原因となる。測定光学系の二つの光軸を含む面が正確に歯車の中心軸を通るように配置しなければならない。このような、アラインメントの狂いによる系統的な測定誤差を明らかにすることが重要であり、幾何学的に機械的な精度を高めると同時に、あらかじめマスタとなる形状の測定を通して狂いを把握し、ソフトウェア的に補正するなどの手段を講じることが課題となる。

また、装置各部の剛性の不足も測定結果の不確かさにつながる。現在被測定歯車を設置するテーブルに市販のx y zテーブルを用いているが、より剛性の高いものへと変更することが必要である。

さらに、歯先および歯底の測定ができていない。原因はそのような場所から得られる反射光が鏡面反射光で、歯面部分から得られる反射光との間に極端なコントラストの差ができるために歯面すべての像を撮影することが困難なためである。このような場合、直線偏光した光を照射し、偏光面の変化した光をと

らえることで、正反射光の影響を取り除くことが考えられるが、現在のタングステンランプでは光量が不足している。光強度的に様な光源が必要であることから、レーザ光を用いてこのような処理を行うことを検討中である。

7. 結 言

本研究の成果をまとめる。

- (1) 光切断法に基づく、微小モジュール歯車歯形測定器を製作し、モジュール 0.2、歯数 190 枚のホブ切り標準平歯車の歯形精度測定を行った。
- (2) 測定に際し、基準円筒に対する測定を行って、測定座標系の歯たけ方向の測定基準位置を与えることで歯車中心からの位置を確定した。
- (3) 得られた光切断像の画像処理を行い、各点のy座標を基に理論的な歯形でのx座標値を計算し画像との偏差を基に歯形誤差を求めた。
- (4) 測定結果は、市販の接触式測定機により得られた誤差とほぼ同等であり、測定の妥当性が確認された。

また、次のような点が今後の課題として残った。

- (1) 歯面の表面粗さが、それに伴う乱反射光によるものも含めて、測定結果に現れる。本報では歯形誤差を表面うねりと見なして、フィルタを通すことでその多くを除去できることを示したが、フィルタの設計方法についてはさらに検討を加える必要がある。
- (2) 装置各部の精度や剛性が結果に現れる。装置各部の組立精度等が測定結果に及ぼす影響を明らかにし、精度、剛性共に向上させること、的確な補正方法を開発することが必要である。
- (3) 測定範囲が歯先付近や歯底付近を除く部分に狭められている。特に歯先近傍は歯車使用時の振動や騒音の原因となることが考えられ、測定範囲を広げることが望まれる。光学系の改善などにより、歯先部分や歯底付近にも測定範囲を広げる必要がある。

最後に本研究を行うにあたりご支援いただいた（株）ハーモニックドライブシステムズ城越教夫氏、長野県精密工業試験場丸山六男氏に感謝する。また、装置製作にご協力いただいた長野県下諏訪町（株）五味工業の皆さん、そして信州大学工学部生産システム工学科実習工場堤信一技官および傳田廣幸技官に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 松岡浩仁，賀勢晋司，茂木義久：微小モジュール歯車の歯形精度測定への光切断法の応用（光ピックアップ利用の試み），設計工学会誌，31, 2 (1996) 67，
- 2) 松岡浩仁，賀勢晋司，藤井裕之，伊東達也：微小モジュール歯車の歯形精度測定への光切断法の応用（第1報），精密工学会誌，63, 4 (1997) 585，
- 3) 青木保雄：精密測定（2），コロナ社，(1990) 326，
- 4) 加川幸雄：アナログ／デジタル・フィルタ，科学技術出版社，(1981) 62．