

歯車偏心誤差のインプロセス計測に関する研究*

大岩 孝彰** 吉田 理***

In-process Measurement for Gear Eccentricity

Takaaki OIWA and Osamu YOSHIDA

This paper describes a measuring method for the eccentricity and some lower-order transmission errors of the rotating gear. The amplitude and the phase of the eccentricity are estimated by the harmonic analysis on the transmission error between two pinion gears meshing together the object gear. This method measures not only the gear eccentricity generated during the manufacturing process but also runout and deflections of the gear shaft and its bearings during operation. The transmission error of the meshing three gear system was measured by two encoders and a pulse counter connecting to the personal computer. The amplitude and the phase of the gear eccentricity were calculated by the fast Fourier transformation independently of the systematic errors and the misalignments of the pinion gears and the encoders. After adjustment of the center of the object gear using an $r-\theta$ stage with a micrometer head, the eccentricity decreased considerably from 262 μm to 12 μm .

Key Words : gear eccentricity, transmission error, in-process measurement, eccentric gears, fast Fourier transformation

1. 緒 言

歯車は動力を滑らかに伝達し、回転角を正確に伝える必要があるため、歯車の加工後や組立て時には歯車が正しく加工され、組み付けられているか測定する必要がある。歯車列に回転誤差などがある場合、機械が精密であるほどこの影響は無視できないほど大きくなり、例えば印刷機では印刷物の色ズレなどが生じる。このような歯車の誤差には大きく分けて、歯形誤差やピッチ誤差のような短周期のものと、偏心のように歯車一回転にわたって観察される長周期のものに分けられる。特に後者の長周期の誤差成分の測定は、歯溝にピンなどの測定子を挿入して測定する歯溝の振れの測定¹⁾がマスタ歯車や基準円盤を用いるかみあい精度試験などによって行われてきた。

しかしこのような誤差の発生要因は、歯切り時の製作誤差や歯車取付時のアライメント誤差などの静的要因だけでなく、軸受の回転誤差や歯車列運転時の負荷変動などに起因する軸や軸受のたわみなどの動的な要因なども考えられる。そこで機器の運転中における歯車の偏心等の誤差を高精度にインプロセスで測定し、調整することができれば機器の性能向上に有効であると考えられる。また、従来のかみ合い試験方法などでは、高精度なマスタ歯車や基準円盤などが必要であったり、ロータリエンコーダなどの高精度な角度測定器を試験歯車と同軸に精密に取り付ける必要などがあった。そこで本報では、このような設置の困難さを解決し、ロータリエンコーダの器差やアライメント誤差などの影響を受けずに、歯車列の高速運転時においても試験歯車のみ偏心成分を含む低次の誤差成分を測定する方法について述べ、実験において歯車の偏心を調整した結果につい

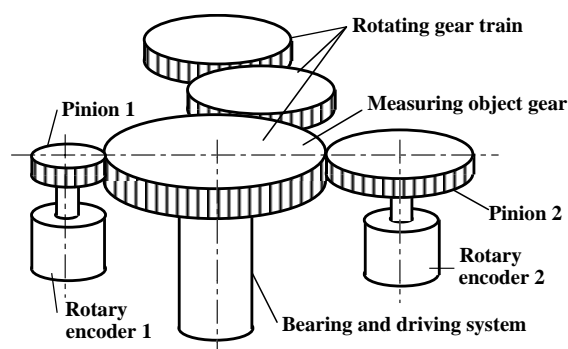


Fig. 1 Measurement setup for transmission error of the rotating gear train

て報告する。

2. 原 理

2.1 概 要

まず、測定装置の概略を図1に示す。運転中の歯車列中の任意の試験歯車に対して、ロータリエンコーダ1および2が同軸に取り付けられた小歯車1と小歯車2をかみ合わせる。試験歯車は機器に組み込まれた状態で回転しているため、小歯車1と小歯車2も試験歯車によって回転させられる。このように本手法の装置の設置は運転中の試験歯車にかみ合わせるのみで完了する。ここで、小歯車1の回転角速度に対する小歯車2の回転角速度は、試験歯車の歯数 Z に関わらず、小歯車1の歯数 Z_1 と小歯車2の歯数 Z_2 の比となる。これらの三つの歯車は設置時に偏心等の誤差を持っているが、エンコーダ1が正確に回転したときの、エンコーダ2のパルスの発生ムラ、つまり小歯車1の回転に対する小歯車2の回転伝達誤差を考えることにする。

* 原稿受付 平成13年 月 日

** 正 会 員 静岡大学工学部 (浜松市城北3-5-1)

*** 静岡大学大学院

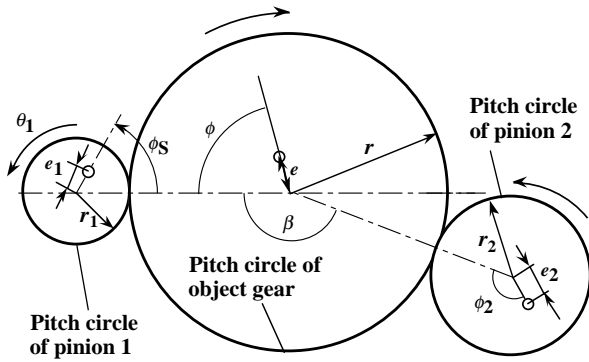


Fig. 2 Pitch circles of meshing object gear and two pinions at $\theta_1=0$ (white circles mean the center of rotation)

2.2 3 段歯車列の回転伝達誤差

図 2 は偏心を持っている三つの歯車がかみ合っている様子を示している。このような偏心歯車の挙動については幾つかの研究がなされている²⁾。ここでは幾何学的に近似した式³⁾を用いる。図のように配置された偏心歯車列において、ピッチ円半径を r 、偏心量を e 、偏心位相を ϕ 、測定開始位相を ϕ_S とすると、小歯車 1 の回転角 θ_1 に対する小歯車 2 の回転伝達誤差 $\Delta\theta$ は以下の式で近似できる。

$$\Delta\theta \approx \frac{e}{r_2} \left[\sin \left\{ \frac{r_1}{r} (\theta_1 + \phi_S) + \phi + \beta \right\} - \sin \left\{ \frac{r_1}{r} (\theta_1 + \phi_S) + \phi \right\} \right] - \frac{e_2}{r_2} \sin \left\{ \frac{r_1}{r_2} (\theta_1 + \phi_S) + \phi_2 \right\} + \frac{e_1}{r_2} \sin(\theta_1 + \phi_S) + C \quad (1)$$

上式の各パラメータの添字 1 および 2 は小歯車 1 および 2 を、添字がないものは試験歯車を表す。試験歯車が 1 回転するあいだ伝達誤差の測定を行うとすると、その間に小歯車 1 は r/r_1 回転する。つまり θ_1 は 0 から $2\pi r/r_1$ まで変化するため、式 (1) の右辺第 1 項は試験歯車の偏心 e に起因する回転伝達誤差の 1 山成分を、第 2 項は小歯車 2 の偏心 e_2 による (r/r_2) 山成分、そして第 3 項は小歯車 1 の偏心 e_1 による (r/r_1) 山成分をそれぞれ示すことになる。また、試験歯車と小歯車 1 に対する小歯車 2 の設置角度 β は右辺第 1 項すなわち 1 山成分の大きさに影響し、 $\beta = \pi$ のとき 1 山成分は最大となるが、 $\beta = 0$ のとき 0 となり試験歯車の偏心成分が検出できなくなる。したがって、 $\beta = \pi$ となるように三つの歯車は一直線上に配置すると都合がよい。このとき式 (1) は、

$$\Delta\theta \approx \frac{2e}{r_2} \sin \left\{ \frac{r_1}{r} (\theta_1 + \phi_S) + \phi + \pi \right\} + \frac{e_2}{r_2} \sin \left\{ \frac{r_1}{r_2} (\theta_1 + \phi_S) + \phi_2 + \pi \right\} + \frac{e_1}{r_2} \sin(\theta_1 + \phi_S) + C \quad (2)$$

となる。測定時に観察される回転伝達誤差の 1 山成分の振幅 $E = 2e/r_2$ と位相 $\Phi = (r_1/r)\phi_S + \phi + \pi$ を FFT 解析により求めることができれば、試験歯車の偏心量の大きさ e と位相 ϕ は以下の式により計算することができる。

$$e = \frac{r_2 E}{2} \quad (3)$$

$$\phi = \Phi - \pi - \frac{r_1}{r} \phi_S \quad (4)$$

また、小歯車 1 と小歯車 2 の偏心の影響は回転伝達誤差の (r/r_1) 山成分と (r/r_2) 山成分に現れるが、これを整数山にする必要がある。さらに、小歯車 1 と 2 の成分を分離して検出するために

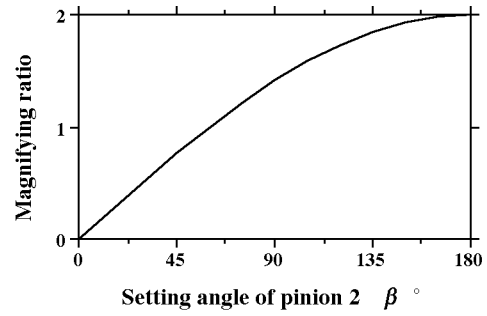


Fig. 3 Effect of setting angle of pinion2 on magnifying ratio

は、各歯車の歯数は

$$Z_1 : Z : Z_2 = 1 : 2n : 2k \quad (5)$$

でなければならない。ただし、 n と k は 2 以上の整数で、 $n > k$ の関係が必要である。

2.3 測定条件の検討

まず、小歯車 2 の設置角度 β が偏心の大きさに及ぼす影響を調査した。1 式の右辺第 1 項において、 β を 0 から 180° まで変化した場合の 1 山成分の振幅の変化を図 3 に示す。縦軸の値に e/r_2 を乗じたものが測定される伝達誤差の 1 山成分の振幅となる。この図から設置角度は前述のように 180° の場合に最大となり、このとき設置角度に多少の誤差があっても、振幅の大きさの変化は非常に少ないことがわかる。

次に、歯車列の回転伝達誤差を測定する小歯車 2 に取り付けるロータリエンコーダ 2 の分解能について検討する。前節のように、回転伝達誤差の 1 山成分の振幅は $E = 2e/r_2$ [rad] であるから、これを測るエンコーダ 2 の 1 回転当たりの必要パルス数 p は、

$$p = \frac{2\pi}{E} = \frac{\pi r_2}{e} \quad (5)$$

となる。例えばピッチ円半径 $r_2 = 30$ mm 程度の小歯車 2 を用いて試験歯車の $1 \mu\text{m}$ 程度の偏心を検出したい場合、 $2 \times 0.001 / 30 = 66.7 \mu\text{rad}$ (13.8°) の分解能のエンコーダ (約 94,000 パルス/回転) が必要となる。 r_2 が大きい場合は、さらに高分解能なエンコーダが必要となる。

また、ロータリエンコーダ 2 に高分解能なものを使用すると、そのパルスをカウントするカウンタの許容入力周波数を考慮する必要がある。試験歯車を n rps で回転したときの小歯車 2 の回転数は nr/r_2 rps であるから、エンコーダ 2 の出力周波数は

$$f = \frac{r}{r_2} pn \quad (6)$$

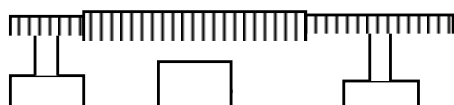
であり、カウンタの許容入力周波数をとすると、試験歯車の許容回転数 (rps) は、以下の式で表される。

$$n_c = \frac{r_2 f_c}{r p} \quad (7)$$

例えば、小歯車 2 と試験歯車のピッチ円半径を $r_2 = 30$ mm、 $r = 120$ mm、カウンタの許容入力周波数を 20 MHz、144,000 パルス/回転のエンコーダを使うとすると、 $n_c = 34.7$ rps = 208 rpm となる。

3. 実験装置

実験装置の概略を図 4 に、写真を図 5 に示す。実験では $\beta = \pi$ となるように小歯車 1 と小歯車 2 および測定歯車を一直線上に



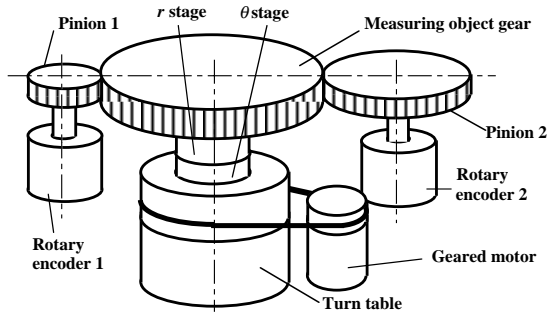


Fig. 4 Experimental setup for measuring transmission error of three gear system

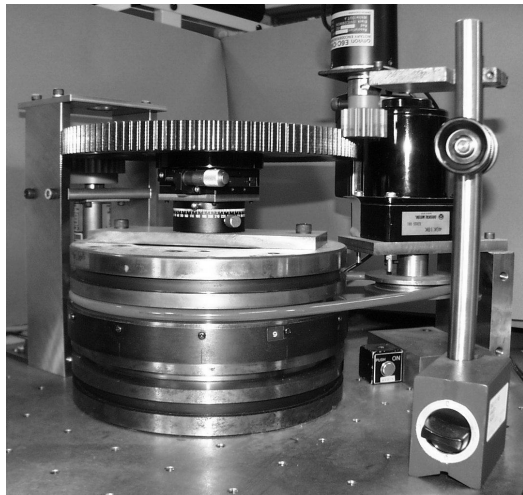


Fig. 5 General view of the experimental setup for measurement of eccentricity

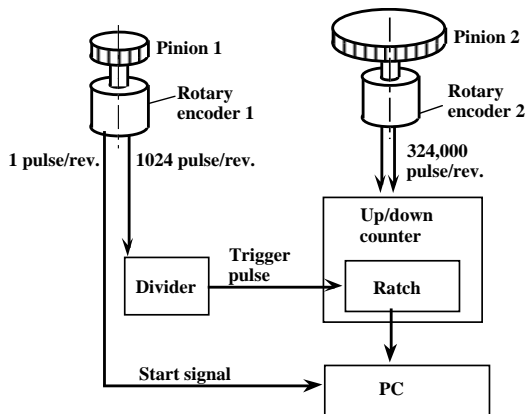


Fig. 6 Block diagram of data acquisition system for the transmission error between pinion 1 and pinion 2

配置した。各歯車は市販の標準歯車（小原歯車工業）を用いた。歯数などの各歯車の緒言を表 1 に示す。表中の歯数を用いると、 $r/r_2=4$ 、 $r/r_1=8$ であるから、小歯車の偏心は 4 山成分と 8 山成分となって現れることが予想される。試験歯車は転がり案内方式のターンテーブル（半径方向・軸方向の振れ：0.2 μm 以下）の上に偏心調整用のマイクロメータヘッド（分解能 10 μm ）付 r - θ ステージを介して取り付けられた。

図 6 は信号処理回路のブロック線図である。小歯車 2 と同軸

Table 1 Specifications of object gear and two pinions

	Pinion 1	Object gear	Pinion 2
Module		2	
Pressure angle		20°	
Number of tooth	15	120	30
P. C. D.	30 mm	240 mm	60 mm
Material	MC901	SC45C	MC901
Grade(JIS B1702)	#5	#4	#5

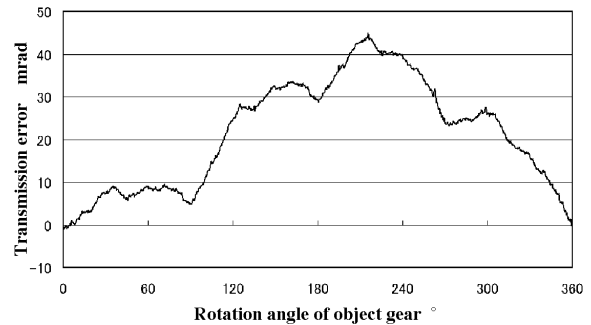


Fig. 7 Measured transmission error before adjusting the eccentricity of object gear

に取り付けたエンコーダ 2 は、一回転 81,000 パルスのもの（キャノン R-1L、累積誤差 20" 以下）を 4 通倍し 324,000 パルスとして用いた。このエンコーダ 2 から出力される 90° 位相差のパルスはアップダウンカウンタ⁴⁾により計数される。測定分解能は $2\pi \text{ rad} / 324,000 = 1.939 \times 10^{-5} \text{ rad} = 19.39 \mu\text{rad} (= 4.0")$ となる。

サンプリングのタイミングパルス発生用の小歯車 1 に取り付けられたロータリエンコーダは、FFT 解析をおこなうため、1 回転あたり 2ⁿ パルスのものを使用する必要がある。本報では 1 回転 1024 パルスのもの（オムロン、E6C-C）を使用し、分周器で 1/4 に分周したため、1 回転当たり 256 パルスとなる。

アップダウンカウンタ内には、計数した値をこのタイミングで保持するラッチ回路が内蔵されており、パーソナルコンピュータはその値を読み込む。以上の回路により、小歯車 1 が一定角度回転するごとに小歯車 2 の回転角度を、歯車列の回転を停止させることなく測定できる。回転伝達誤差がない場合、1 回のサンプリングで小歯車 2 は $180^\circ / 256 = 0.703125^\circ$ 回転することになる。さらにエンコーダ 1 から 1 回転に 1 パルスが出力されるのを利用して、常に同一の試験歯車の回転角度から測定を開始することとし、試験歯車が 1 回転するあいだの $256 \times 8 = 2048$ 点のデータを取得した。

4. 実験結果

4.1 偏心修正前の伝達誤差

前章で説明した装置により、試験歯車が 1 回転する間測定した回転伝達誤差を図 7 に示す。縦軸は回転伝達誤差を小歯車 2 の回転角度にて表してある。横軸は試験歯車の回転角度で表した。図から試験歯車が 1 回転する間に、回転伝達誤差に試験歯車の偏心に起因する 1 山成分が大きく現れていることがわかる。この回転伝達誤差を FFT により周波数解析を行い、成分ごとに振幅を表したものを図 8 に示す。縦軸は各山成分の振幅を、横軸は山数を表している。この図から、1 山成分の他に 4 山、8 山、16 山、24 山、32 山、60 山などの成分が観察される。これら 4 山以上の成分は小歯車 1 および 2 の偏心等の誤差

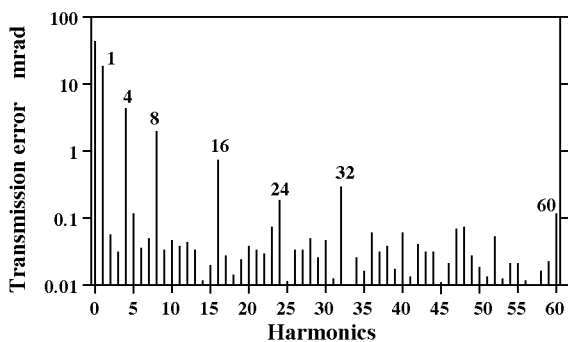


Fig. 8 Amplitude of measured transmission error before adjusting the eccentricity

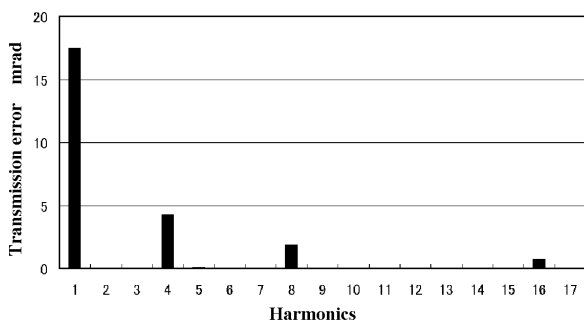


Fig. 9 Amplitude of measured transmission error before adjusting the eccentricity

やエンコーダ 1 および 2 の器差などに起因するもの、およびそれらの高次の成分であると考えられる。図 8 の 1 ~ 16 山までの成分を図 9 に示す。

この 1 山成分の振幅と位相から (3) および (4) 式を用いて試験歯車の偏心 e と位相 ϕ を求めた結果、 $e = 262 \mu\text{m}$ 、 $\phi = 73.2^\circ$ が得られた。これから、図 4 に示した $r-\theta$ ステージを用いて試験歯車の偏心誤差の調整を行った。

4.2 偏心修正後の伝達誤差

調整後、再度測定した回転伝達誤差を図 10 に、FFT による周波数解析結果を図 11 に示す。調整を行ったことによって、試験歯車の偏心に起因する 1 山成分が著しく減少している（約 17.5 mrad → 1 mrad 以下）こと、その他の 4 山および 8 山成分はまったく変化がないことがわかる。これは前述のように、4 山および 8 山などの成分は主に小歯車やエンコーダの誤差に起因するものと推察されるから、試験歯車の偏心調整により減ずることはない。このときの試験歯車の偏心は $e = 12 \mu\text{m}$ となり、調整前の 4.6% まで減少させることができた。以上の偏心調整は 10 μm 読みのマイクロメータヘッド付微動ステージを用いて行ったが、電気マイクロなどの測長センサを併用し、偏心測定と調整を繰り返すことで、さらに高精度な調整が行えると思われる。

5. 考 察

本実験の場合、小歯車 1 に関する誤差に起因する回転伝達誤差は 8 山成分以上に現れ、さらに小歯車 2 に関する誤差に起因する回転伝達誤差は 4 次以上に現れる。したがって、1 山、2 山および 3 山成分は試験歯車とそれを支持する軸受に関する誤差に起因することになる。例えば 2 山成分が観察された場合、このような累積ピッチ誤差があるか、回転軸に対する試験歯車軸心の傾きによるものであると推察できる。このように、本手

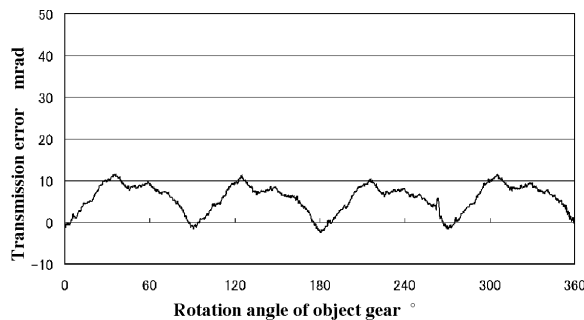


Fig. 10 Measured transmission error after adjusting the eccentricity

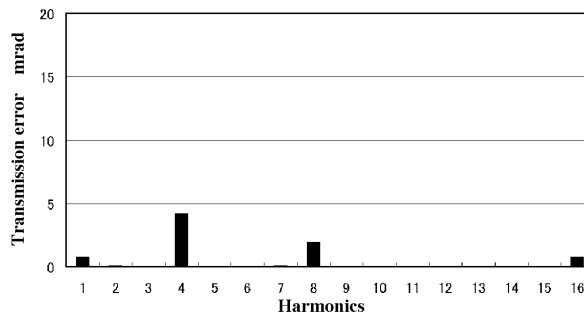


Fig. 11 Amplitude of measured transmission error after adjusting the eccentricity

法を用いれば、試験歯車の偏心だけでなく、機器運転中の比較的 low 次成分の試験歯車の誤差についても測定ができ、調整が可能になると思われる。この場合は Z に対して Z_1 および Z_2 をより小さめに設定すれば、より高次の成分まで測定ができる。

また、今回の偏心調整はマイクロメータヘッド付の微動ステージを用いて行ったが、圧電素子などのアクチュエータを組み込んだ偏心調整用微動機構を機器に設置すれば、インプロセスで偏心測定だけでなく偏心の補正も行えるようになる。

6. 結 言

機器の運転中における歯車の偏心誤差を測定するため、試験歯車に対して二つの小歯車をかみ合わせる測定方法を提案し、実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 一方の小歯車に対する他方の小歯車の回転角度を測定して得られた回転伝達誤差を周波数解析することにより、試験歯車の偏心の振幅と位相を推定した。
- (2) 測定の結果、試験歯車の偏心成分と小歯車の持つ誤差成分を分離させて検出が可能であった。
- (3) 測定により得られた試験歯車の偏心成分の振幅値と位相を用いて試験歯車の偏心調整を行った結果、262 μm あった試験歯車の偏心を 12 μm に低減させることができた。

参 考 文 献

- 1) JIS B1751.
- 2) 例えば石田喜助：偏心歯車，日本機械学会論文集，**15**，50 (1949) IV-80.
- 3) 楠田敏明，池田雅夫：偏心歯車列における回転誤差，日本機械学会第76期全国大会講演論文集(V)，(1998)79.
- 4) 大若孝彰，小林和夫，豊山 晃：精密鼓形ウォームギヤの製作 - ウォーム研削装置の試作 - ，精密工学会誌，**54.2**(1988)408