研究論文

歯車の騒音・振動計測における平均成分の抽出法*

西田 知照** 小林 洋一** 塚本 尚久***

Extraction of Average Component of Gear Vibrations and Gear Noises

Noriteru NISHIDA, Youichi KOBAYASHI and Naohisa TSUKAMOTO

Vibrations and noises of gears consist of the average component and the fluctuant one. The former is the component which always appears in each tooth meshing. In general, this component consists of the meshing frequency and its harmonics. The latter is the component which fluctuates about the average component and is caused by the error of gears, torque fluctuation, and so on. In this report, the extraction of this average component by using a method of moving averages is described. This method is very effective for extracting the average component of gear noises or gear vibrations. The effectiveness of this method is shown theoretically and experimentally.

Key words: gear noise, gear vibration, average component, fluctuant component, moving average method, error of gear

1. 緒 言

歯車の振動や騒音波形は平均成分と変動成分とに分けられる。前者は1歯のかみあいごとに繰り返し現れる平均的な振動・騒音成分であり、後者は各歯での誤差による動荷重の変動や計測時の雑音など平均成分のまわりにばらつく成分である。従って、動荷重や誤差によって発生する成分であっても、どの歯においても規則正しく現れる成分は平均成分となる。従って、ここでいう平均成分とは、一般的には、歯車の歯の1歯1歯のかみあいによって生じるかみあい周波数成分とその高調波を意味する。

歯車の振動と騒音の関係を調べようとする場合や、歯車騒音の発生メカニズムを解明しようとする場合には変動成分は除き、平均成分のみを抽出して検討するようにすれば振動と騒音の関係などの把握が容易になる。

平均成分の抽出法の一つとして加算平均法がある。しかし、この方法では1歯ごとの平均成分は抽出できない。また、加算平均を実行中に歯車の回転数が変化したような場合には処理されたデータ中に回転変動による誤差が入り込む危険さえある。

以下では、平均成分の抽出法として、移動平均法を

考え、その効果について、理論および実験的考察を行う。具体的な振動・騒音波形の処理結果から、この移動平均法は非常に有効な処理方法であることが分かる。

平均成分の抽出が行えれば、変動成分すなわち雑音成分の抽出は原波形から平均成分を除去することによって容易に行うことができる。

使用記号

f_0, ω_0 : かみあい周波数 (Hz), 角周波数 (rad/s)
 f_m, ω_m : 回転周波数 (Hz), 回転角周波数 (rad/s)
 Z : 歯車歯数
 n : 歯車回転数 (rpm)
 T : 歯車1回転当たりの時間 (s)
 Δt : 1歯当たりのかみあい時間 (s)

2. 移動平均法

移動平均法は工学の分野ではもちろんのこと他分野でも広く利用されている手法である。ここでは、理論上歯車の歯のかみあいは1歯ごとに同じかみあいが繰り返されるという性質を利用した移動平均法について、その効果を理論的に検討する。

歯車の速比が1対1の場合について考えると、歯のかみあいの状態は歯車の1回転ごとに誤差を含めて同じ状態が繰り返されるものと考えることができる。すなわち、歯車の回転によって生じる振動・騒音波形のうち最も周期が長い成分でも、その周期は歯車の1回

* 原稿受付 昭和61年12月25日, 昭和61年度精密工学会九州支部福岡地方講演会(昭和61年11月21日)にて発表

** 正 会 員 長崎大学工学部(長崎市文教町1-14)

*** 正 会 員 千葉工業大学(習志野市津田沼2-17-1)

転相当の周期であり、他の成分はこれより短い周期をもつことになる。歯車の歯数を Z 、回転数を n (rpm) とすると、歯車の回転周波数 f_m およびかみあい周波数 f_0 は次のように表される。

$$f_m = n/60, \quad f_0 = Z \cdot n/60 = Z \cdot f_m \quad (1)$$

また、これらを回転角周波数で表現すると

$$\omega_m = 2\pi f_m, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (2)$$

となる。式 (1) の f_m あるいは式 (2) の ω_m が最も周期の長い成分であり、他の成分は、これらの高調波であると考えることができる。

歯車の振動・騒音波形中のかみあい周波数成分やその高調波は、歯車のもつ誤差や動荷重の変動、負荷変動などによって、その周波数や振幅が絶えず変化する。その結果、周波数スペクトルとしては、かみあい周波数 f_0 やその高調波 $i \cdot f_0$ ($i=2, 3, \dots$) のまわりに、 f_m 間隔で多くの側帯波が現れる¹⁾²⁾。これらの側帯波（ここでいう変動成分であり、平均成分に対する雑音と考える）を移動平均法によって消去する方法を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi}{\omega_0} \\ T &= \frac{1}{f_m} = \frac{2\pi}{\omega_m} \\ \frac{T}{\Delta t} &= \frac{\omega_0}{\omega_m} = \frac{f_0}{f_m} = Z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

とおくとき、 Δt は 1 歯当たりのかみあい時間、 T は歯車 1 回転当たりの時間を意味する。かみあい角周波数が ω_0 の波とその高調波（角周波数 $i\omega_0$ ）およびそれらの側帯波（角周波数 $i\omega_0 \pm j\omega_m$ ($i, j=1, 2, \dots$)) を同時に含んだ波が式 (4) で与えられるものとする。

$$V_0 = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega_0 t + \alpha_i) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \quad (4)$$

式 (4) の表す波を時間軸方向に $k\Delta t$ ($k=1, 2, \dots, Z$) だけずらした波 V_k を作る。この波は次式で表される。

$$\begin{aligned} V_k &= \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos\{i\omega_0(t + k\Delta t) + \alpha_i\} \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)(t + k\Delta t) + \beta_{ij}\} \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} a_i [\cos\{i\omega_0 t + \alpha_i\} \cos ik\Delta t\omega_0 \\ &\quad - \sin\{i\omega_0 t + \alpha_i\} \sin ik\Delta t\omega_0] \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} [\cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \\ &\quad \times \cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)k\Delta t\} \end{aligned}$$

$$- \sin\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \sin\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)k\Delta t\}] \quad (k=1, 2, \dots, Z) \quad (5)$$

ここで、式 (3) から

$$\Delta t\omega_0 = 2\pi, \quad \Delta t\omega_m = \Delta t\omega_0/Z = 2\pi/Z \quad (6)$$

であることに注意すると、式 (5) はさらに次式のように変形される。

$$\begin{aligned} V_k &= \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega_0 t + \alpha_i) \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \left[\cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \cos\left(\pm jk \frac{2\pi}{Z}\right) \right. \\ &\quad \left. - \sin\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \sin\left(\pm jk \frac{2\pi}{Z}\right) \right] \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega_0 t + \alpha_i) \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \left[\cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \cos\left(jk \frac{2\pi}{Z}\right) \right. \\ &\quad \left. \mp \sin\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \sin\left(jk \frac{2\pi}{Z}\right) \right] \quad (k=1, 2, \dots, Z) \quad (7) \end{aligned}$$

式 (7) を用いて、 $V = (V_1 + V_2 + \dots + V_Z)/Z$ を作る。

$$\begin{aligned} V &= \sum_{k=1}^Z V_k/Z \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega_0 t + \alpha_i) \\ &+ \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \left[\cos\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \right. \\ &\quad \times \sum_{k=1}^Z \cos\left(jk \frac{2\pi}{Z}\right) \\ &\quad \left. \mp \sin\{(i\omega_0 \pm j\omega_m)t + \beta_{ij}\} \sum_{k=1}^Z \sin\left(jk \frac{2\pi}{Z}\right) \right] \end{aligned}$$

ここで、

$$\sum_{k=1}^Z \cos\left(jk \frac{2\pi}{Z}\right) = 0, \quad \sum_{k=1}^Z \sin\left(jk \frac{2\pi}{Z}\right) = 0$$

であるので、

$$V = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\omega_0 t + \alpha_i) \quad (8)$$

となり平均成分、すなわち、かみあい周波数成分とその高調波のみ残り、変動成分（側帯波）は除かれる。いま、式 (4) に示された成分以外の周期性を有しない成分、例えば、白色雑音や単発的な信号などが原信号に含まれている場合、これらの信号は完全には消去されないが $1/Z$ 倍されるので SN 比も向上する。

以上の処理は模式的には図 1 に示すように、歯車 2 回転分の波を準備し、この波から歯車の 1 歯当たりのかみあい時間 Δt だけその始点をずらした波、 $2\Delta t$ だ

Fig. 1 Components in moving average

けずらした波, ..., $Z\Delta t$ だけずらした波を抽出し, これら Z 個の波を加え合わせることによって実現できる。しかし, 実際の処理に当たっては次のような注意が必要である。まず, 振動や騒音の原波形の収録中は回転数を極力一定に保つことと, その期間の回転数または 1 回転の周期を正確に検出する必要がある。なぜならば, この値によって Δt の値を算出するからである。さらに, 時間軸方向のずらし量 $k\Delta t$ の値はデータ収録時のサンプリング時間の精度と同じ精度になるように四捨五入するのがよい。

以上の議論では歯車の速比を 1 対 1 としたが, 速比が 1 対 1 でない場合でも, 小歯車または大歯車を単独で考えれば, その歯数および回転数に関して, これまでに示した式はそのまま成立する。歯車の騒音や振動中の変動成分は誤差の大きい歯車によって支配される。従って, 小歯車と大歯車のうち一方の誤差が他方に比べて大きいことが分かれば, その誤差の大きい方の歯車について以上の議論を適用すればよい。変動成分を支配しているのがどちらの歯車か明らかでない場合には, 移動平均の対象として準備すべき騒音または振動波形の時間的長さは次に述べるように長くしなければならない。

小歯車と大歯車の歯数比を最も簡単な整数比に直した結果が a 対 b の場合は, 小歯車が b 回転あるいは大歯車が a 回転すれば両歯車の歯のかみあいは 1 周期し, 完全に最初のかみあい位置に戻る。いいかえると, 両歯車についての総合誤差もこの周期で繰り返される。従って, この場合に準備すべき波形は小歯車の $2b$ 回転分となる。 b の値が大きく $b=50$ の場合は 100 回転分の波形が必要となる。このように多くの波形を準備

Table 1 Specification of gears and running condition

Number of teeth	$Z_1 : Z_2$	40 : 40
Module	m	5 mm
Face width	b	30 mm
Input RPM	n	600 rpm
Output torque	T_o	9.8 Nm
Meshing frequency	f_o	400 Hz
Rotational frequency	f_m	10 Hz

Fig. 2 Rotational vibration wave of a gear (before averaging)

できない場合には, これよりずっと少ない回転数で両歯車の歯のかみあいが完全には 1 周期しないまでも, ほぼ 1 周期する回転数を見い出せれば, これを 1 周期とみなして代用することもできる。この場合, 移動平均の効果は当然減るが, 移動平均処理をしない場合と比べれば, 一般には十分な処理効果が得られる。

速比が a 対 b の場合の歯数 Z や回転数 n の取扱いは次のようにすればよい。速比が 1 対 1 の場合の歯車の歯数と回転数をそれぞれ Z, n とすれば, 速比が a 対 b の場合はこれらの Z, n をそれぞれ $bZ, n/b$ と置き換えて扱う。

3. 処 理 例

3.1 歯車の円周方向振動波形の処理

以下の処理例において使用した歯車の諸元および運転条件を表 1 に示す。

図 2 は歯車端面に取り付けた 1 個の加速度型ピックアップで検出した歯車の円周方向振動波形である。なお, 実際には, 後の高速フーリエ変換 (FFT) 処理に必要なデータ長, すなわち, 歯車 5 回転分のデータを収録した。波形は歯車の 1 回転を 1 周期とする低周波成分で波打っている。この低周波成分はピックアップが重力の加速度を検出したものである。図 2 の波形に対し FFT 処理を行った結果が図 3 である。歯車の回転周波数 (10 Hz) およびかみあい周波数 (400 Hz) とその高調波以外に多くの側帯波が生じている。ピックアップを 2 個用いることによってこの低周波成分 (10

Fig. 3 Spectrum of rotational vibration of a gear (before averaging)

Fig. 4 Rotational vibration wave of a gear (after averaging)

Fig. 5 Spectrum of rotational vibratoin of a gear (after averaging)

Hz)を相殺させることもできるが、側帯波はそのまま残る。

これに対し、図2の波形に移動平均処理を行うと図4となる。図4によって、低周波成分(10 Hz)が除かれたばかりでなく、1歯ごとのかみあい振動波形がきれいに抽出されていることが分かる。図4の波形をFFT処理すると図5が得られる。図5から、移動平均法によって側帯波は完全に消え、かみあい周波数とその高調波だけが抽出されたことが分かる。

3.2 歯車騒音波形の処理

図6は歯車のかみあい点から軸方向に100 mmの位置に設定したマイクロホンで収録した騒音波形であ

Fig. 6 Noise wave of gears (before averaging)

Fig. 7 Spectrum of gear noise (before averaging)

Fig. 8 Noise wave of gears (after averaging)

る。前節の図2と同様に歯車5回転分のデータ中1回転分のみを示している。騒音の振幅は歯車の1回転を1周期として変化している。これは歯車の偏心誤差によって生じたものと考えられる¹⁾。また、1歯ごとのかみあい音波形は大きく乱れており、その形を認識することはむづかしい。図6の波形をFFT処理すると図7が得られる。図7には歯車の誤差によると思われる側帯波¹⁾²⁾を含め多くのスペクトルが現れている。図6の波形に対し移動平均処理を施した結果が図8である。移動平均法によって1歯ごとのかみあい音波形が明りょうに抽出されていることが分かる。図8の波形をFFT処理した結果が図9である。かみあい周波数(400 Hz)とその高調波が残り、側帯波はほとんど消えている。1400 Hz付近と1800 Hz付近に少し残った成分がある。これは、歯車の回転数が600 rpmからごくわ

Fig. 9 Spectrum of gear noise (after averaging)

ずかづれたことにより、 ω_m がわずかにずれ、その結果、かみあい周波数の高調波まわりの高次の側帯波ほど周波数のずれも大きくなり理論通りの相殺効果が得られなかったものと思われる。

4. 結 言

歯車の振動および騒音波形は平均成分と変動成分(側帯波)から成っている。一般に、歯車の振動や騒音

の間の関係を検討する場合は、平均成分から比較を開始するのが分かりやすい。ここでは、これらの2成分の中から平均成分を抽出する方法の一つとして移動平均法を扱った。具体的な処理法としては、歯車2回転分(歯数比が a 対 b の場合は小歯車の $2b$ 回転分)の騒音や振動波形を準備し、この波形から始点を1歯分、2歯分、…そして、 Z 歯分 (bZ 歯分) ずらした1回転分 (b 回転分) の波を切り出し、これらを加え合わせた後 $1/Z$ 倍 ($1/(bZ)$ 倍) すればよい。この方法が平均成分の抽出法として非常に優れていることを理論および実測波形の処理例によって示した。また、この移動平均法は加算平均と同様に SN 比も改善するものである。

参 考 文 献

- 1) 西田知照, 丸木勇治: 歯車の偏心誤差と騒音スペクトル, 精密機械, 47, 4 (1981) 471.
- 2) 西田知照, 丸木勇治: 歯車の偏心誤差と騒音スペクトル (第2報) —— 高次の変調波による FM・AM, 精密機械, 51, 3 (1985) 547.

新素材の潜在市場, 21 世紀には 114 兆円

工業開発研究所(東京都中央区新川2-1-7, 理事長・小林宏治氏, 電話 03-552-4401)では、このほど新材料・新素子の開発に関する国際戦略をまとめた。

それによると、ファインセラミックス、アモルファス合金や複合素材など新素材の西暦2000年の潜在市場規模は自由世界全体で約114兆円と83年実績の16倍に拡大されることが予想される。このうち日本の市場規模は16兆円で、14%を占めることになる。

同調査研究は総合研究開発機構(理事長・下河辺淳氏)の助成研究としてまとめたもので、先進諸国の新素材開

発状況や潜在需要の推計としてファインセラミックス、高性能高分子素材、複合素材、新金属素材を対象として予測したものである。

その推計結果によると、日本の市場規模はファインセラミックスがIC基板、コンデンサ、圧着素子など電磁気的用途を中心に5兆4900億円に拡大、高分子素材ではエンジニアリングプラスチックが伸びて3兆3500億円になる。また新金属類は現在試作中のものが多く、1990年ごろから実用化、2000年に向けて急速に拡大すると見ている。中でも太陽電池用のシリコン、アモルファス合金、超電導合金の潜在需要が高い。

以上を合計した新素材の市場規模は15兆9870億円で83年の13倍に達する。

日本の推計結果をベースにした自由世界の市場予測では、光ファイバが北米を中心に11兆8200億円、太陽電池用素材は発電適性比の高い東アジア、北米で潜在需要が高く、その他の一般素材は西欧、北米、東アジアの先進工業地域のシェアが圧倒的である。この結果、自由世界の市場規模は全体で114兆1700億円に上るものと予測している。

(服部 敏夫)

2000 年の新素材の市場規模

(単位: 10 億円)

年(西暦)	1983 年 自由世界(内日本)	2000 年 自由世界(内日本)
新素材内訳		
ファインセラミックス (除光ファイバ等)	3 532 (678)	28 722 (5 492)
光ファイバ等光学材料	301 (17)	11 828 (634)
高性能高分子素材	2 441 (470)	17 568 (3 359)
複合材料	203 (39)	10 993 (2 102)
新金属素材(除太陽電池)	— (—)	11 245 (2 150)
太陽電池用素材	445 (34)	33 818 (2 250)
合 計	6 922 (1 238)	114 174 (15 987)