

ねじ型工具歯車加工に起因する ゴースト音発生メカニズム

Mechanism of Occurrence of Ghost Noise in Helical Gears Resulting from Thread-type Tool Machining

江 上 領*
Ryo EGAMI

近 藤 忠 身*
Tadami KONDO

伊 熊 元 紀**
Motoki IKUMA

要 旨

ABSTRACT

歯車のかみあい次数の非整数倍で発生するゴースト音は、発生次数から発生原因を特定することが難しく、対策も試行錯誤を繰り返していた。また、近年、自動車用トランスミッションに用いられているはずば歯車の歯面研削仕上げ工程において、生産効率の高い多条ねじ型工具による連続創成加工が多用されるようになり、新たなゴースト音が発生している。本研究では、工具の多条化に伴い顕在化してきたゴースト音の発生メカニズムを明らかにし、加工条件と発生次数の関係を解明した。また、その実機証明および対策検討として、加工条件を変化させることによってゴースト音を低減させることができることを確認した。

Specifying the origins of ghost noises produced at non-integral multiples of gear meshing order frequency from the order at which they occur represents a challenge, and determining countermeasures for these forms of noise has involved a process of trial and error. Today, with the widespread use of a method of continuous generation involving the use of a multiple-thread-type tool for high production efficiency in the process of grinding the flanks of the helical gears used in automotive transmissions, new ghost noises have appeared. The research discussed in this paper clarified the mechanism behind the production of the ghost noises that have become noticeable as a result of the use of the multiple-thread-type tool, and identified the relationship between the conditions used in the grinding process and the orders at which the noises occur. By verifying these findings in an actual transmission and studying countermeasures, the project demonstrated that ghost noises could be reduced by modifying the conditions used in the grinding process.

1. まえがき

ギヤ音は、通常、歯車のかみあい次数およびその整数倍で発生する。しかし、かみあい次数の非整数倍で発生する場合があり、これをゴースト音(Ghost noise)と呼ぶ⁽¹⁾。ゴースト音の原因は、歯車加工時に発生する周期的な歯面上のうねりであり、うねり振幅が $1\mu\text{m}$ 以下の微小な場合でもゴースト音の原因になることが知られている^{(2), (3)}。ゴースト音の原因となるうねりは、前述のように振幅が微小であることと、一歯あたりの周期が整数にならない、すなわち、発生次数がかみあい次数の非整数倍となる複雑な周期性を持っているため、通常の歯面形状測定ではうねりの周期を特定するのが困難である^{(2), (3)}。また、その複雑な周期性に

より、発生メカニズムの推定が難しい。以降、ゴースト音の原因である一歯あたりの周期が整数にならない歯面上のうねりを、ゴーストうねりと呼ぶ。

ゴーストうねりの発生メカニズムとしては、ねじ型工具による連続創成加工時のワークまたは工具の駆動歯車の伝達誤差によるものなどが明らかにされている⁽⁴⁾。

一方、近年、自動車用トランスミッションに用いられるはずば歯車の歯面研削仕上げ工程で、生産効率の高い多条ねじ型工具による連続創成加工が多用されるようになり、発生原因が未知のゴースト音が顕在化してきた。そのため、その発生メカニズムの解明、およびゴースト音低減手法の検討が必要になってきた。

* 四輪開発センター

** 本田技研工業株式会社

2. ゴースト音発生歯形データの特徴

Fig. 1 は自動車用トランスミッションの動力伝達経路であり、Fig. 2はこのトランスミッションを用いて回転スイープ中に測定したトランスミッションケース振動のデータである。横軸はドライブシャフト基準の次数、縦軸はドライブシャフト回転数を示す。ドライブシャフト回転基準で、ファイナルギヤかみあい1次は71次、4th ギヤかみあい1次は137.6次であり、トランスミッションケース振動にピークとして現れている。Fig. 2 に現れている 331 次および 662 次は、歯車のかみあい次数の整数倍にならないゴースト次数である。このゴースト音は、発生有りと発生無しのトランスミッションのクロスチェックから、ねじ型工具による連続創成歯面研削で加工したファイナルドリブンギヤが原因であることがわかっている。

これまでに発生メカニズムが明らかにされてきた加工機械駆動軸の伝達誤差などが原因であるゴーストうねりについては、インボリュート方向と歯すじ方向にゴーストうねりが発生し、このうちインボリュート方向の形状測定データを用いてうねりの周期、および振幅を評価する手法の研究がおこなわれている⁽²⁾。しかし、本研究で対象とするゴースト音では、インボリュート方向にゴーストうねりは発生せず、歯すじ方向にゴーストうねりが発生している。

Fig. 3 は、Fig. 2 のゴースト音が発生しているファイナルドリブンギヤ連続4歯の歯すじ形状測定データである。約3mmの波長を持つ周期的なうねりがみられる。また、となり合う歯に対してうねりの位相が約 1mm ずつ変化しており、1番歯と4番歯のうねりの位相がほぼ同様になるよ

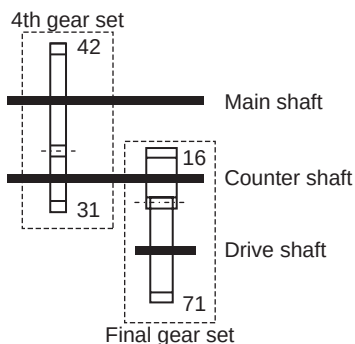


Fig. 1 Drive train of transmission in 4th gear

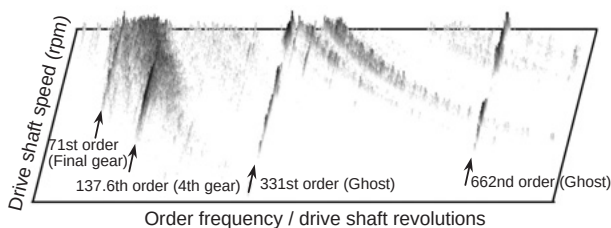


Fig. 2 Waterfall plots of transmission case vibration

うな規則性を持っている。

うねりの次数は、歯すじ形状測定データのFFT解析をおこなうことで特定することができる。Fig. 4で示すように、かみあい平面上のリード長1ピッチ分を L_p とし、歯すじ形状測定データを長さ L_p だけ切り出しかみあい進行に沿って全歯分つなぎ合わせ、歯車1回転分の歯すじ測定データを連続した一つの波形データとしてFFT解析をおこなう。Fig. 5(a)はFig. 3のゴースト音が発生した歯車の歯すじ形状測定データを用いて全歯FFT解析をおこなった結果である。一方、Fig. 5(b)はゴースト音が発生していない歯車の全歯FFT解析結果である。Fig. 5(a)はFig. 2のゴースト次数と一致した次数にうねり振幅のピークが確認でき、Fig. 5(b)はゴースト次数で顕著なうねりのピークが無いことから、歯すじ方向に現れる周期的な歯面うねりがゴースト音の原因であると考えられる。

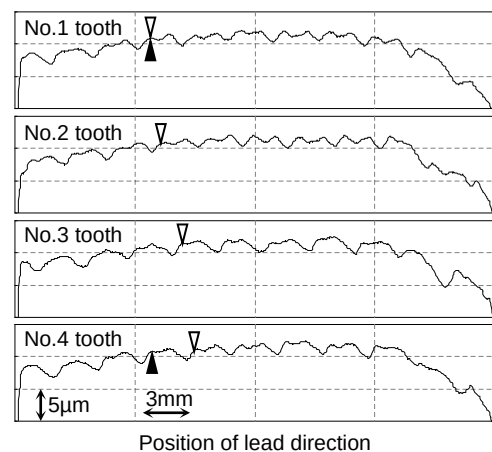
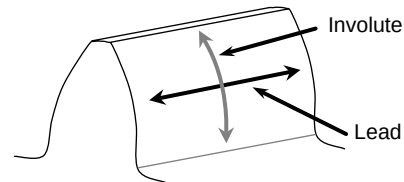


Fig. 3 Measured lead form of 'Ghost' gear

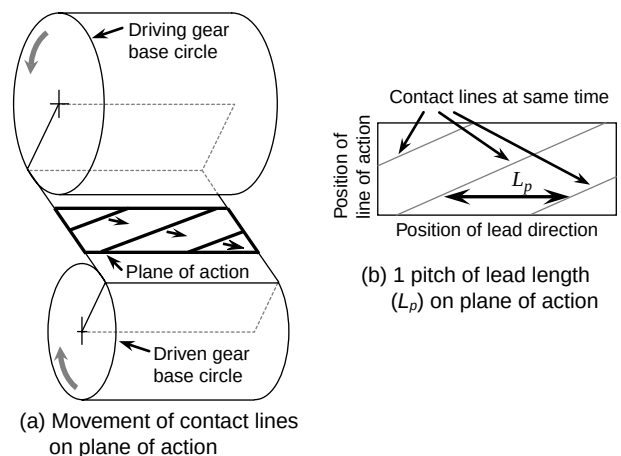
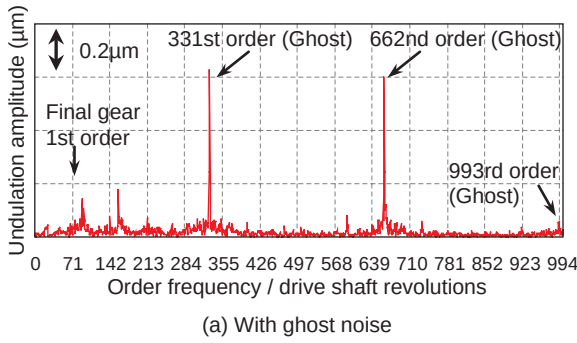
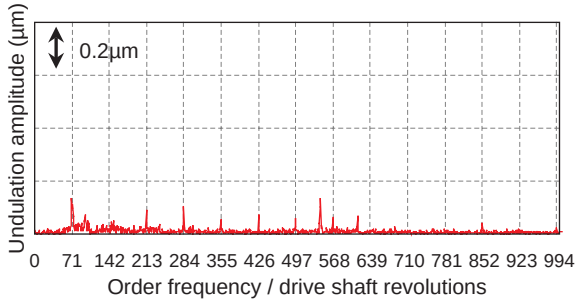


Fig. 4 Contact lines on plane of action



(a) With ghost noise



(b) Without ghost noise

Fig. 5 Spectra of FFT analysis for compound data of lead forms of all teeth

3. ねじ型砥石による連続創成歯車研削時のゴーストうねりの発生メカニズム

3.1. 砥石送りピッチによるゴーストうねりの発生メカニズム

Fig. 6 に、ねじ型砥石による連続創成歯車研削時のワークと砥石の動きを示す。ワークと砥石がかみあうように回転することでインボリュート形状が創成され、さらに砥石がワーク軸方向に送り運動をおこなうことで歯すじ形状が創成される。歯すじ方向には砥石が断続的にしか作用しないため、歯面には Fig. 7 のような砥石送りピッチによるうねりが発生する。 F_p はワーク 1 回転当たりの砥石送り量である。また、後続歯の同一インボリュート部分が創成される

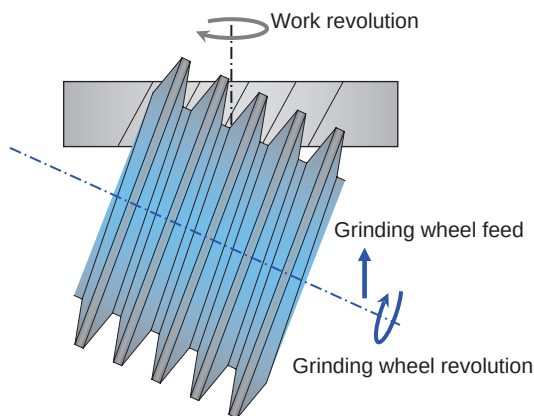


Fig. 6 Motion of grinding wheel and work during continuous generation process in gear grinding

Table 1 Simulation conditions

(a) Gear specifications

Number of teeth (Z_w)	10
1 pitch lead length (L_p)	3 mm

(b) Grinding conditions

Feed pitch (F_p)	1 mm / work rev.
----------------------	------------------

までの間にも砥石の送り運動がおこなわれるため、ワーク歯数を Z_w とすると、となり合う歯同士では、式(1)で示す δ_1 だけうねりの位相がずれることになる。

$$\delta_1 = \frac{F_p}{Z_w} \quad (1)$$

Fig. 8 は、Table 1 のような諸元、加工条件で発生する、ほぼ歯車の歯すじうねりの様子を正弦波で表現したものである。1 ピッチリード長 L_p あたり 3 周期の送りピッチうねりが発生し、となり合う歯同士でうねりの位相が δ_1 だけずれている。かみあい順序に沿ってつなぎ合わせたデータの FFT 解析をおこなった結果が、Fig. 9 であり、31 次のゴースト次数にピークがみられる。かみあい 3 次である 30 次から 1 次だけ異なる次数になるのは、となり合う歯とのうねり位相差 δ_1 がワーク歯数分積み重なることでうねり波長 F_p に等しくなるからである。Fig. 8 の例では、かみあい進行方向に対し砥石送り方向が逆である。このため、となり

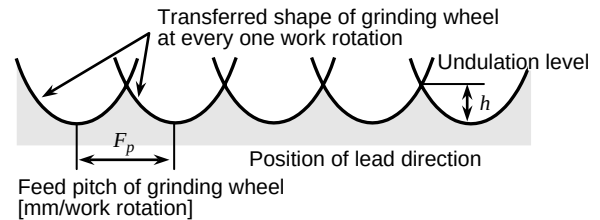


Fig. 7 Undulation of wheel feed pitch generated on lead form

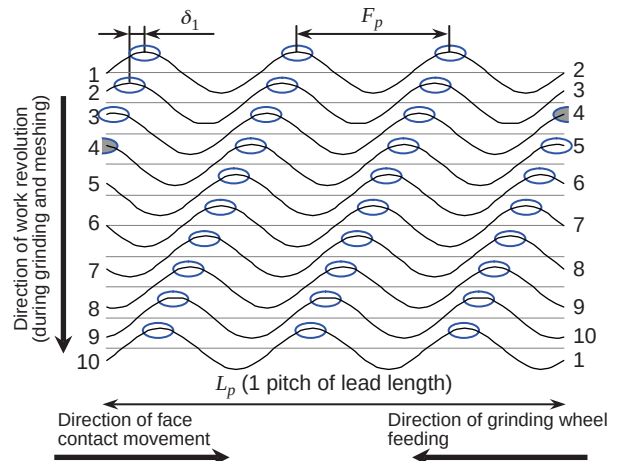


Fig. 8 Mechanism of ghost order generation by feed pitch undulation cycle

の歯にかみあい移行する際に δ_1 ずつ位相が詰まることになり、ワーク1回転でちょうど1波長分のうねりが増えることになる。逆に、かみあい進行方向と砥石送り方向が同じになるような加工条件の場合、ワーク1回転でちょうど1波長分のうねりが減ることになる。以上より、砥石送りピッチうねりにより発生するゴースト次数 G_1 は式(2)のようになる。

$$G_1 = Z_w \cdot N_1 \pm 1 \quad (2)$$

$$N_1 \cdot \text{整数} \doteq \frac{L_p}{F_p}$$

式中の正負の符号は、かみあい進行方向と砥石送り方向が等しい場合マイナスの符号、逆の場合プラスの符号となる。また、かみあい時のワーク回転方向に対して加工時の回転方向が逆になる場合、位相差 δ_1 の発生方向が反転するため、式(2)中の正負の符号も反転することになる。Fig. 10はTable 1の条件で $F_p = 0.857$ (mm/work rev) とし、1ピッチあたり3.5周期のうねりを与えた時の正弦波によるFFT解析結果である。この場合、式(2)中の整数 N_1 は3もしくは4となり、31次、41次のどちらにも振幅のピークが発生する。このように、式(2)中の N_1 は砥石送りピッチ F_p によって決まる整数であり、右辺第二項の正負の符号は、砥石送り方向やワーク回転方向によって決まるので、加工条件によって発生するゴースト次数が変化する。

Fig. 7 に示したうねり振幅 h は、ワークに作用する砥石の幾何学的な形状と砥石の送りピッチから近似的に算出できる。Fig. 11は砥石ねじ面形状を円盤として近似したものである。ワークへの作用点を原点とし、 x 軸はワーク歯すじ

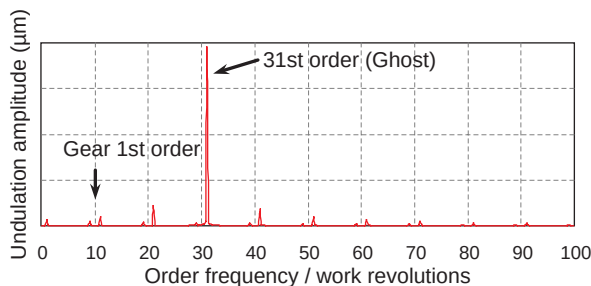


Fig. 9 Spectra of simulated ghost undulation (with Table 1 conditions)

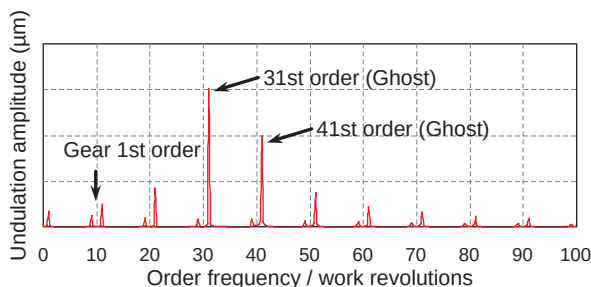


Fig. 10 Spectra of simulated ghost undulation (with Table 1 conditions when $F_p = 0.857$)

方向を、 y 軸は円盤軸方向を、 h 軸はワーク歯面法線方向を表す。点 O を頂点とし OA を母線とした円錐の xy 平面における断面形状を xh 平面に投影することで、ワーク歯すじに転写されるうねり形状が得られるとすると、幾何学的な関係より次の式を得る。

$$x^2 + r^2 = r'^2, \quad y = (r' - r) \cdot \tan \alpha_n, \quad h = y \cdot \cos \alpha_n$$

連立方程式を h について整理すると、式(3)を得る。 ($h \ll r \sin \alpha_n$ のため、 $(r \sin \alpha_n + h)^2 \approx (r \sin \alpha_n)^2 + 2rh \sin \alpha_n$ の近似を使用。)

$$h = \frac{x^2 \cdot \sin \alpha_n}{2r} \quad (3)$$

砥石送りピッチが F_p のとき、 $x = F_p / 2$ を代入した値がうねり振幅 h になり、Fig. 12に定量的なうねり振幅値の計算例を示す。うねり振幅 h は送りピッチ F_p の2乗に比例して大きくなり、また、砥石径に反比例する。

3.2. 多条砥石の誤差によるゴーストうねりの発生メカニズム

Fig. 13左図は1条砥石、右図は2条砥石の例である。2条砥石は、1条砥石に比べてねじの進み角が大きく、同じ砥石回転数で加工をおこなった場合、ワークの回転速度が2

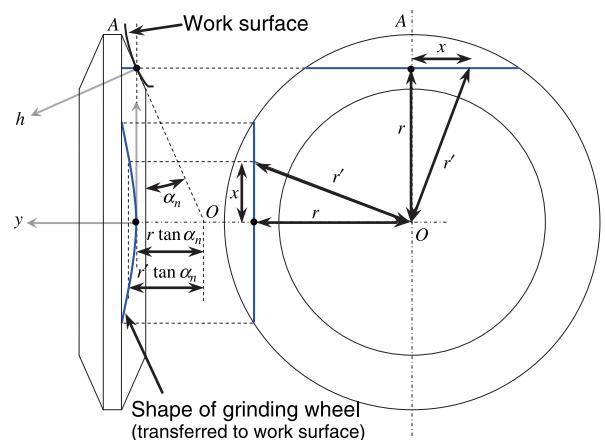


Fig. 11 Shape of grinding wheel transferred to lead shape on work

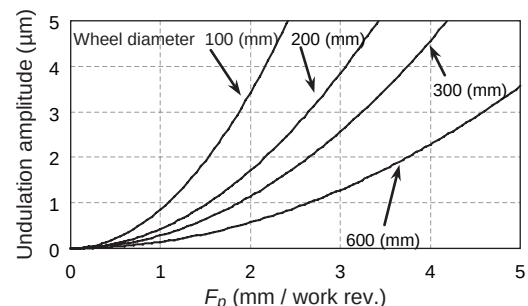


Fig. 12 Relation between F_p and undulation amplitude ($\alpha_n = 20^\circ$)

倍になるため、生産効率が高くなる。近年、このような多条砥石による歯車研削が多用されるようになってきた。

工具条数はワーク歯数の約数とならないように設定するのが一般的であり、その場合、ワーク1回転ごとに異なる砥石ねじ面がワーク歯面を研削する。砥石ねじ面のピッチ誤差や砥石偏芯などの誤差がある場合、ワーク1回転ごとに砥石の切り込み量変動するうねりが発生する。Fig. 14に、2条砥石を使用した場合の砥石誤差 E_s とうねり h の関係を示す。

ワーク1回転あたりのゴースト次数を予測する目的において、仕上がり歯面に何本の砥石ねじ筋研削跡が残るかによってパターン分けをおこなう必要があり、このパターンは砥石条数 Z_j だけ存在することになる。Fig. 15 は $Z_j=3$ の場合に考えられるゴーストうねり形態の例である。これらのゴーストうねり形態をもつ波形を、歯すじ位置を x として式(4)のように表現する。

$$h = \sum_{i=1}^{Z_j} a_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} \cdot x\right), \quad \lambda_i = \frac{Z_j \cdot F_p}{i} \quad (4)$$

a_i の値を変化させることによって、ゴーストうねり形態の違いを表現することが可能である。Fig. 16 は $Z_j=3$ の場合の例で、Fig. 16 (a) は $a_1=a_2=a_3$ とした場合であり、3本のねじ筋が誤差を持ちながらも、仕上がり歯面にすべてのねじ筋の研削跡が残るような形態である。Fig. 16 (b) は、 $a_1=a_2 \neq 0, a_3=0$ とした場合であり、1本のねじ筋が他の2本のねじ筋に対して相対的に大きな誤差を持ち、仕上がり歯面に2本のねじ筋の研削跡だけが残るような形態である。Fig. 16 (c) は、 $a_1 \neq 0, a_2=a_3=0$ とした場合であり、仕上がり歯面に1本のねじ筋の研削跡だけが残るような形態である。

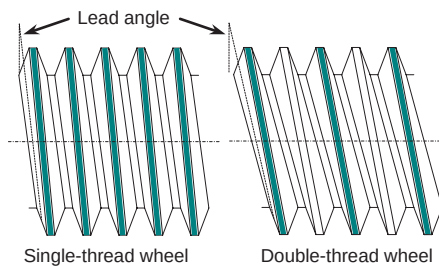


Fig. 13 Single-thread wheel and multiple-thread wheel

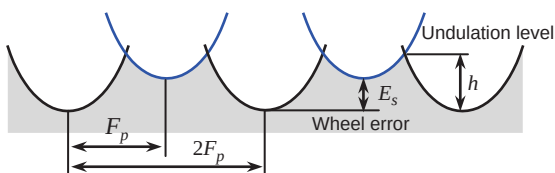


Fig. 14 Undulation of lead form generated by grinding with double-thread wheel

ワーク歯数 Z_w 工具条数 Z_j の組み合わせによって、ワーク回転ごとに研削する砥石ねじ筋の順番が変化するため、となり合う歯のゴーストうねり位相差は、砥石送りピッチ F_p 以外に Z_w, Z_j に依存して決定される。 Z_w と Z_j の関係を、自然数 n, m を用いて式(5)のように表現する。

$$Z_w = n \cdot Z_j + m \quad (5)$$

となり合う歯のゴーストうねり位相差 δ_j は、 Z_j と m の値によって Table 2 のように決定される整数 N_m を用いて、式(6)のようになる。

$$\begin{aligned} \delta_{Z_j} &= \frac{F_p}{Z_w} + N_m \cdot F_p \\ &= \delta_1 + N_m \cdot F_p \end{aligned} \quad (6)$$

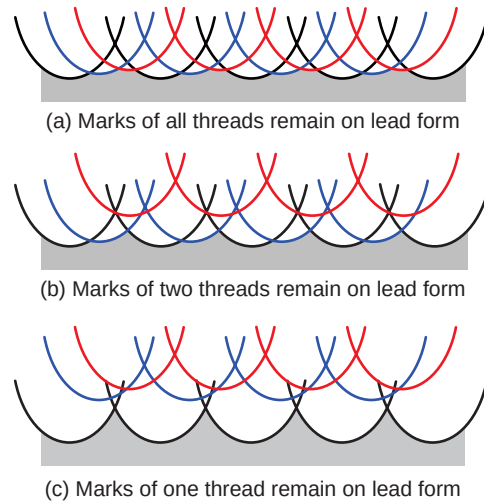


Fig. 15 Ghost undulation patterns in case of grinding with triple-thread wheel

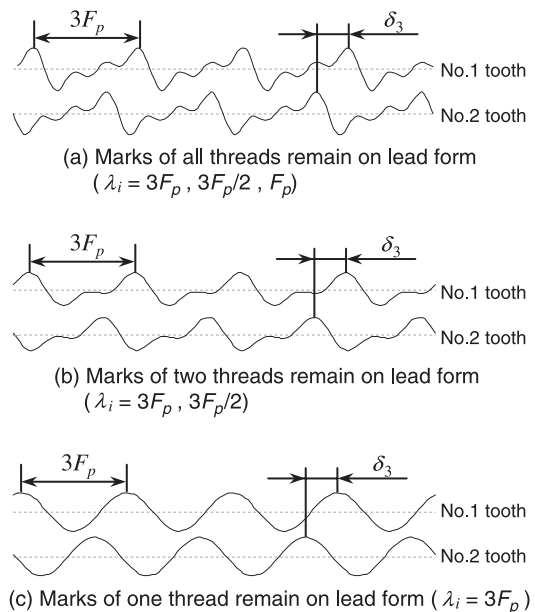


Fig. 16 Simulated ghost undulation patterns in case of grinding with triple-thread wheel

Table 2 Value of N_m

	$Z_j = 2$	$Z_j = 3$	$Z_j = 4$	$Z_j = 5$
$m = 1$	1	2	3	4
$m = 2$	—	1	—	2
$m = 3$	—	—	1	3
$m = 4$	—	—	—	1

Table 3 Relation between ghost undulation pattern and ghost order number in case of grinding with triple-thread wheel

Undulation pattern	Wavelength of synthetic wave	Ghost order frequency
Fig. 16(a)	$F_p, 3F_p/2, 3F_p$	G_1, G_{32}, G_{31}
Fig. 16(b)	$3F_p/2, 3F_p$	G_{32}, G_{31}
Fig. 16(c)	$3F_p$	G_{31}

式(4), および式(6)を用いて, k 番歯のゴーストうねり波形 h_k は式(7)のようになる。

$$h_k = \sum_{i=1}^{Z_j} a_i \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot i}{Z_j \cdot F_p} \cdot (x \mp k \cdot \delta_{Z_j}) \right) \quad (7)$$

式中の位相を決定する正負の符号は, 加工時のワーク回転方向, および砥石送り方向によって決まる。式(7)の波形をワーク全歯数分つなぎ合わせた波形のFFT解析をおこなうことでゴースト次数を特定することができ, 式(7)において $a_i \neq 0$ の場合に発生するゴースト次数 G_{ji} は式(8)のようになる。

$$G_{ji} = \frac{N_{ji} \cdot Z_w \pm i}{Z_j} \quad (8)$$

$$N_{ji} = Z_j \cdot N \pm i \cdot N_m \doteq \frac{i \cdot L_p}{F_p}$$

(N : 整数)

Table 3 は Fig. 16 で示した3条砥石の場合のゴーストうねり形態とゴースト次数の関係を整理したものである。また, 2章で示した Fig. 5 (a) の全歯 FFT 解析結果は, 3条砥石を用いて歯面研削をおこなったワークのものである。993 次は $G_{33}(=G_1)$, 662 次は G_{32} , 331 次は G_{31} に当ては

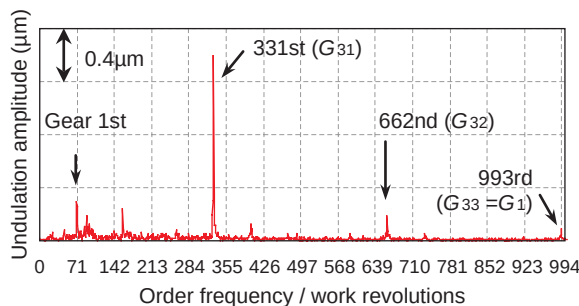


Fig. 17 Example of ghost order frequency in case of grinding with triple-thread wheel

まるゴーストうねりである。中でも, 331 次(G_{31})と 662 次(G_{32})の振幅が支配的であり, 加工時の砥石の研削状態として Fig. 16 (b) の形態に近いと考えられる。Fig. 17 は Fig. 5 (a) と同一歯車の逆歯面の全歯 FFT 解析結果である。Fig. 17 は 331 次(G_{31})が他の 662 次(G_{32}), 993 次(G_{33})に比べて支配的であり, Fig. 16 (c) のような形態のゴーストうねりが発生していると考えられる。

ゴーストうねりの振幅は, Fig. 15 (c) のような1筋の砥石研削跡のみが仕上がり歯面に残る形態の場合に最大となる。この場合のゴーストうねり振幅 h_{max} は, 砥石直径を D とし, 式(3)に $x = Z_j \cdot F_p / 2$ を代入することで式(9)のようになる。

$$h_{max} = \frac{Z_j^2 \cdot F_p^2 \cdot \sin \alpha_n}{4D} \quad (9)$$

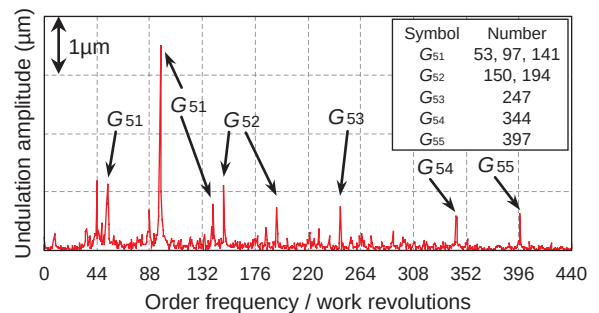


Fig. 18 Example of ghost order frequency in case of hobbing with five-thread hob

4. 多条ホブの場合

多条ねじ型工具としては, これまでに述べた研削砥石の他に, 歯切り工程で用いるホブがある。多条ホブ加工で発生するゴーストうねりの発生メカニズムもこれまでに述べた研削砥石の場合と同じである。Fig. 18に5条ホブで歯数44のワークを加工した場合の歯すじ形状全歯測定データのFFT解析結果を示す。式(8)で得られるゴースト次数 G_{ji} が発生している。5条ホブによる歯切り工程においても, 歯すじ方向に発生するゴーストうねりの次数が正確に予測できていることが確認できる。

5. 多条砥石使用時のゴーストうねり改善策

これまでに述べたように多条砥石使用時に歯すじ方向に発生するゴーストうねりの振幅は, 砥石の送りピッチと精度の影響を受ける。例えば, Fig. 19のように2条砥石で誤差が大きく, うねりの振幅が最大となる場合に対し, Fig. 20のように送りピッチを細かくすることでうねり振幅を小さくすることが可能と考えられ, 送りピッチ縮小によるゴースト

ストウねりとゴースト音の改善効果を検証した。

Fig. 21 (a) は、ワーク回転基準 310 次のゴースト音が発生する送りピッチ条件 F_p と、 F_p の 0.77 倍、0.62 倍、に送りピッチを縮小して加工したワークの全歯 FFT 解析結果である。送りピッチの縮小に伴い、ゴースト次数が 448 次 (G_{21})、586 次 (G_{21}) に変化し、ゴーストうねり振幅は低減している。なお、ゴースト次数が変化しているのは式 (8) 中の N_{ji} の値が変化しているためである。Fig. 21 (b) は、これらのワークをトランスミッションに組んで測定したトランスミッションケース振動のスペクトルを比較したデータであ

る。測定条件としては、トランスミッションケースの周波数特性を考慮し、ゴースト発生周波数をそろえている。送りピッチの縮小によって、暗振動レベルに対するゴースト次数のピークレベルが低減し、ゴースト音低減効果が実機でも確認できた。

6. まとめ

ねじ型砥石を用いた歯車加工時において、ゴースト音発生の原因となる歯面うねりの発生メカニズムについて考察し、以下のことを明らかにした。

- (1) ゴーストうねりの次数は、砥石の条数、砥石の送りピッチ、砥石の精度、砥石の送り方向、ワークの回転方向によって決まることを示し、その次数決定の法則性を定式化した。
- (2) 定式化したゴーストうねりの次数が、実加工歯車で発生するものと同じであることを確認した。
- (3) 上記の検証として、砥石送りピッチ縮小による、歯面うねり改善、ゴースト音改善の効果を実機にて確認した。

参考文献

- (1) Matson, G. A., Houser, D. R.: The Use of Ghost Noise as an Exciter for High Frequency Gear System Dynamics, International Conference on Gears, VDI, p.739-750(1996)
- (2) Matsumura, S., Kitahara, A., Houjoh, H.: Prediction of Ghost Noise Occurrence on Ground Helical Gears with Detailed Surface Measurement (Gear Dynamics and Noise), Proceedings of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, p.79-83(2001)
- (3) Ratanasumawong, C., Matsumura, S., Houjoh, H.: Inspection of Tooth Surface Geometry by Means of Vibration Measurement, JSME International Journal, Series C, Vol.48, No.4, p.704-714(2005)
- (4) Mark, W. D.: Contribution to the vibratory excitation of gear systems from periodic undulations on tooth running surfaces, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, Issue 1, p.166-186(1992)

著者



江上 領



近藤 忠身



伊熊 元紀

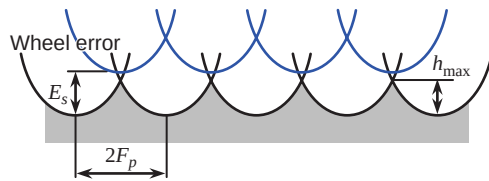


Fig. 19 Ghost undulation when marks of one thread remain on lead form ground by double-thread wheel

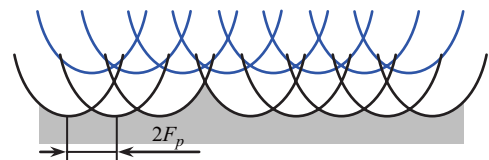
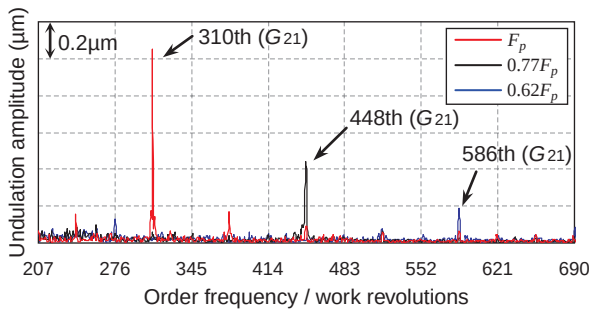


Fig. 20 Enhancement of undulation by reduction of feed pitch



(a) Spectra of FFT analysis for measured lead forms in case of changing feed pitch of grinding wheel



(b) Spectra of transmission case vibration occurring when changing feed pitch of grinding wheel

Fig. 21 Experimental results for reduction of ghost noise by reduction of wheel feed pitch