研 究

歯車の超音波振動シェーピングに関する研究*

岡本 隆** 小川 昌平** 木村 文秀*** 故工 藤 建彦****

Study of Ultrasonic Vibration Shaving of Gear

Takashi OKAMOTO, Shohei OGAWA, Fumihide KIMURA, Takehiko KUDO

In the present paper, the results of basic experiments conducted on ultrasonic vibration shaving is described, as a mean of obtaining the smooth surface.

As first step, the cutting mechanism in vibration shaving was investigated, then the shaving was performed by running a cutter in meshing with a work gear supplied the ultrasonic vibration. After shaving, accuracy of gear, surface roughness of gear tooth and noise in running were measured, then these results were compared with those in case of ordinary method.

These results when summarized are as follows.

(1) The cutting direction of shaving cutter on the tooth surface and the rake angle of cutting edge in cutting vary in every moment. And there is the period when tooth surface is not cut, which changes in compliance with the position of tooth surface and the vibration conditions.

(2) The roughness of tooth surface finished by vibration shaving becomes smoother than that by ordinary shaving, therefore the extent of decrease in the noise in running compared with that before shaving is larger than that in the ordinary method.

(3) The accuracy of gear is improved by shaving, but there is no significant difference between ultrasonic vibration shaving and ordinary shaving.

1. 緒 言

最近の諸機械においては、振動や騒音を防ぐため、歯車の精度、歯面あらさの良好なことが厳しく要求されるようになってきており、ホブ切り後の歯車に各種の精密仕上法すなわち、研削、ラッピング、シェーピング、ホーニングなどが施されている。このうち、歯車のラッピングにおいて、ラップ歯車に超音波振動を与えれば、急速にラップ効果があらわれ、極めて滑らかな歯面がえられたが¹⁾、これに引きつづき筆者らは良好な歯面をえることを目標として、ホブ切りした歯車に周波数 22 kc の超音波振動をその軸方向に与えてシェーピングすることを試みた。

本研究においては、まずコンベンショナル・シェーピング法において、工作歯車に振動を与えた場合の切削過程を解析して歯面に残される切削くいを検討した。ついで工作歯車に負荷をかけて行なうブレーキ・シェーピング方式で実験を行ない、振動振幅、歯面荷重、回転数お

よび送りなどの工作条件を変化した場合について、歯面あらさ、歯車精度および運転時の騒音を測定し、それぞれ普通の無振動シェーピングの場合と比較した。

2. 実験装置および方法

図 1 は実験装置の概略図で、図 2 はその写真である。磁歪振動子①に出力ホーン②を接続し、その先端に工作歯車③を取りつける。超音波振動は 1 kW 発振器④によ

図 1 実験装置概略図

*原稿受付 昭和44年 7月10日。昭和44年度関西地方定期学術講演会(昭和44年 7月10日)にて発表

**正 会 員 京都工芸繊維大学(京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

***三菱重工業三原製作所

****京都工芸繊維大学大学院(当時)

図 2 実験装置の写真

表 1 工作歯車およびシェーピングカッタ

	工作歯車	シェーピングカッタ
モジュール	3	3 (歯直角)
圧 力 角	20°	20° (歯直角)
歯 数	18	59
歯 幅	9mm	25.4 mm
材 質	S45C	SKH2(Hrc63)
ねじれ角	0°	15° RH

り工作歯車の軸方向に与えられる。その周波数は 22 kc で、全振幅は 20μ までである。負荷は⑤のブレーキにより与えられ、トルクメータ⑥、動歪測定器⑦により読みとる。シェーピングカッタ⑧の回転はモータ⑨、送りはモータ⑩により与えられる。なお、切削液はポンプ⑪により循環させる。本研究ではカッタの送りを 1 mm/s にとって 2 往復させてシェーピングした。この場合、カッタ回転数は一般には 150 rpm とし、比較のため 75 rpm, 100 rpm の場合も行った。

工作歯車とカッタの要目は表 1 のようである。工作歯車の歯切りにおいては、かみあい時にカッタ先端との接触を避け、あわせてシェーピングしろを与えるため、プロデュバランスホブを用いた。

3. シェーピングカッタの切削過程の解析

3.1 カッタの切削軌跡

シェーピングカッタのセレーション上の各点が歯車歯面上に描く切削軌跡については仙波氏が解析しているが²⁾、これでは代数 6 次方程式を解くことになり、計算が複雑なので、新居氏らの近似式³⁾により、接触点の軌跡を求めた結果は図 3 のようである。

3.2 カッタの切削速度および方向

シェーピングにおける切削速度は歯車とカッタ両歯面のすべり速度に等しい。図 4 はカッタと歯車の正面図であるが、いまカッタ軸を z 軸、両軸の共通垂線を y 軸、

図 3 カッタの切削経路および方向

図 4 カッタと歯車のかみあい

y, z 軸に垂直に x 軸をとると、幾何学的条件から、歯面上の任意の点での切削速度 v の x, y, z 方向の成分 v_x, v_y, v_z はつぎようになる。

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \omega_c r_c \cos \theta_c - \omega_g r_g \cos \theta_g \cos \Sigma \\ v_y &= \omega_c r_c \sin \theta_c - \omega_g r_g \sin \theta_g \\ v_z &= \omega_g r_g \cos \theta_g \sin \Sigma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに, ω は回転角速度, r はかみあい点までの半径, θ はピッチ点からの回転角, Σ は軸角, 添字 c はカッタ, g は歯車である. これより, 切削速度 v は

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (2)$$

切削機構を解析するにあたっては v の方向を知る必要がある. いま, v' をカッタ正面インポリュート接線方向の切削速度, η' を切削速度の方向とカッタ正面のなす角 (v と v' のなす角) とすれば

$$\cos \eta' = \frac{v'}{v} \quad (3)$$

この v' は座標変換して(1)式より求められる. 前出の図 3 にこの切削方向をあわせ示してある. 厳密には, カッタの送り速度も考慮に入れなければならないが, 切削速度と比較して極めて小さいので, ここでは省略した.

3.3 シェービング時のカッタのすくい角

つぎに, カッタがどのような角度で歯面を切削しているかを考察する. 図 5 において, ある任意の接触点 A を通る円筒に, そこで接する平面 I を考えると, 平面 I 上でのすくい角 γ_1 はその点におけるねじれ角に等しいから

$$\tan \gamma_1 = r_c \tan \beta_{oc} / r_{oc} \quad (4)$$

ここに r_c は接触点までの半径, r_{oc} はカッタのピッチ円半径, β_{oc} はカッタのピッチ円筒上ねじれ角である. また A 点を通り, カッタ歯面に垂直な平面 II 上のすくい角

図 5 すくい角の決定 (1)

図 6 すくい角の決定 (2)

は垂直すくい角 γ_2 であるから, その点の正面圧力角を α_x とすれば

$$\tan \gamma_2 = \tan \gamma_1 / \cos \alpha_x \quad (5)$$

図 6 を参照して, γ_3 を速度すくい角, $\eta = \pi/2 - \eta'$ とすると

$$\tan \gamma_3 = \tan \gamma_2 / \cos \eta \quad (6)$$

3.4 振動シェービングにおける切削機構

(i) 振動シェービングにおける切削こん

以上は普通のシェービングの場合についてであるが, つぎに工作歯車の軸方向に超音波振動が付加される場合を考察する.

いま, f を振動周波数 (本実験においては 22 kc), a を全振幅, t を時間とすると, 振動の変位と速度は図 7 のように示される. 点 1 と 2 は歯面上に描かれる波形の接線方向がカッタセレーションの方向と一致する点である. この 1 から 2 の期間では, カッタが後退するため切削が行われず, 図の太線部分が切削している期間である. 図 8 は歯面上に残される切削軌跡を任意の点において示したものである. ここで v は振動を与えない場合の切削経路の方向で, この線上に沿って振動波形が描かれる. したがって, カッタセレーションの各点がいずれもこのような波形を歯面上に描くので, 図 9 のような波模様で歯面が覆われる. このような切削こんはつぎのよ

図 7 振動の変位と速度

図 8 歯面上の振動切削軌跡

カッタ回転数 75 rpm カッタ回転数 150 rpm

図 9 振動シェービングした歯面の顕微鏡写真

図 10 切削軌跡の比較

うに示される。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{a}{2} \sin \left(\frac{2\pi f}{v \sin \gamma_0} y \right) + y \cot \gamma_0 \\ \cot \gamma_v &= \frac{dx}{dy} = \frac{\pi a f}{v \sin \gamma_0} \cos \left(\frac{2\pi f}{v \sin \gamma_0} y \right) + \cot \gamma_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに γ_0 , γ_v はそれぞれ普通のシェービングの場合と振動シェービングの場合の歯すじと切削方向のなす角である。

図 10 は歯先における切削軌跡を比較したものである。実線はそれぞれの条件において(7)式よりの計算値、破線および一点鎖線は同条件において振動シェービングした歯面の切削こんを拡大して示したものである。切削方向の角度が計算値と約 $4^\circ \sim 5^\circ$ 異なっているほか、切削こんの波形にわずかな差異がみられるが、これはシェービング時のカッタおよび工作歯車の取付誤差、あるいはそれらの歯形修整および各種の歯車誤差などのためと考えられるが、ほぼ、満足すべき傾向を示している。なお実際の波形の振幅は負荷のため、計算のそれよりも若干小さくなっている。

なお、さきの γ_0 を用いて、波形の接線方向がカッタの

セレーションの方向と一致する点での速度 $\bar{v}$ を求めるには、 Σ を軸角とすれば

$$\cot \gamma_v = \frac{\pi a f}{v \sin \gamma_0} \cos \left(\frac{2\pi f}{v \sin \gamma_0} y \right) + \cot \gamma_0 = \tan \Sigma \quad (8)$$

とおき、 $y = (v \sin \gamma_0) t$ を用いれば

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \pi a f \cos 2\pi f t = \\ &= (v \cos \gamma_0 - v \sin \gamma_0 \tan \Sigma) \quad (9) \end{aligned}$$

をえる。

もし、図 8 の点 A の接線方向 α がセレーションの角度 (本実験の場合では 15°) より小さければ、常に切削が行なわれる

ことになる。しかし、一般に振幅が大きくなるとこれが満されず、切削されない範囲がでてくる。つまり、図 7 のように振動の速度曲線とカッタの切削速度線が交わることになる (この場合 v および γ_0 は時々刻々変化するが、周波数が大きいので、1 周期の間ではほぼ一定とみなされる)。すなわち、常に切削が行なわれる条件は歯面上の各点において

$$\pi a f \leq v \cos \gamma_0 - v \sin \gamma_0 \tan \Sigma \quad (10)$$

であることで、これ以外では切削されない期間が存在する。いま、工作条件を変えた場合の切削しない期間の相異を調べると、周波数 f が一定であれば、上述のように振幅 a が大きいほど、また a , f とともに一定であれば、カッタ回転数を小さくするとこれにともない切削速度は小さくなるので、切削されない期間が長くなる。また、同

図 11 振動 1 周期中のすくい角の変化

図 12 歯数の差異によるすくい角の変化

じ条件でも、歯面上の位置によって切削速度が異なるので、歯先部分で切削しない区間がなくても、歯元部分では存在することもあり、一般に歯先よりも歯元の方で著しくなる。これらの様子はつぎに述べるすくい角の変化とあわせて図示する。しかしながら、図 9 のように、シェービングした歯面上の波模様が連続しているのは、カッタ切れ刃が後退時に歯面をバニッシングしているためと考えられる。

(ii) 振動シェービングにおける切れ刃すくい角の変化

振動が付加されたときの速度すくい角を求めるには、(7)式の η_0 を (6) 式の η に代入すればよい。図 11 は振幅を変化した場合の歯面上の各点での速度すくい角の変化を振動 1 周期について示したものである。上より歯先部分、カッタの切削方向が歯すじ方向と一致する点および歯元部分でのそれを示すが、図中の破線は振動を与えない場合である。これより、振動を与えると、1/4 周期までは振動を与えない場合よりも小さいすくい角で切削が行なわれるが、1/4 周期の点でこれらは一致し、それを過ぎるとすくい角は急激に増加し、切れ味をよくしていることがわかる。ところが前述のように、切削しない期間が存在するので、歯面上の位置あるいは振幅の大きさなどによってすくい角の変化は不連続になる。たとえば、切削方向が歯すじと一致する点では、1.5 μ の振幅の場合でも不連続になることがわかる。

図 13 振幅と歯面あらさの関係

図 12 は工作歯車の歯数を変えた場合の歯先における同様の变化を示したものである。無振動の場合には、歯数が多いほどすくい角は小さいが、振動を与えた場合の変化の様子は図のように若干異なってくる。

4. 実験結果

4.1 歯面あらさに対する考察

(i) 振幅の影響

図 13 は振幅を変えてシェービングした場合の歯先付近のインボリュート方向歯面あらさの測定結果の一例である。ホブ切り後のあらさが 3.5~6.5 μ であったものが、普通のシェービングでは 0.8~2.4 μ 程度に改善されている。しかし、7 μ の振幅で振動シェービングすると 0.5~1.2 μ に、20 μ の振幅を与えると 0.4~1.0 μ に減少している。これは振幅が大きくなると、前述のように歯面上を覆う波模様の重なりが広範囲になって歯面の小さな凸起を取り去るためと、図 11 に示したカッタの切削期間でわかるように、振幅を大にすると切削しない区間が長く、この間にバニッシングを行なうので、これらの結果、歯面あらさが改善されるものと考えられる。図 14 はこれらの測定記録の例である。

いっぽう、歯すじ方向のあらさは図 3 に示すように、歯面上の位置によって、切削方向が異なるため変化する。とくに歯面の中央付近では、切削方向が歯すじ方向と一致するので、あらさは小さくなる。振動を与えると、これらはいずれも若干よくなる傾向が認められた。

(ii) カッタ回転数の影響

無振動の場合には、同じ送り速度と同じ送り距離の場合には、カッタセレーションが歯面を削る軸方向のピッチは回転数が小さい場合には大きくなるため、歯面のあらさも若干大きくなる。しかし、振動を与えると、図 9 の写真でわかるように、回転数の小さい場合には、波模様のピッチがつまってくるので、いくらか歯面あらさがよくなるようになる。

(iii) 歯面荷重の影響

本実験においては、歯面荷重を 1~6 kg まで変化させたが、大きな差は認められなかった。

(iv) シェービング方法による差異

以上の実験はすべてアキシアル・トラバース法で行なったが、このほかダイアゴナル法、タンゼンシャル法についてその差異を調べた。この場合、ダイアゴナル法では次式で定められる⁴⁾ 最大送り角 δ によって実験を行なった。

$$\tan \delta = \frac{b_c \sin \Sigma}{b_g - b_c \cos \Sigma} \quad (11)$$

図 14 歯面あらさ測定記録例

図 15 シェーピング方法によるあらさの差異

ここに、 b_c はカッタの有効歯幅、 b_g は歯車の歯幅である。図 15 は歯先付近のインボリュート方向のあらさの測定結果である。各方法によるあらさの差異は軸方向のセレーションの切削こみピッチを計算すれば理解でき(本実験での送り速度 1 mm/s, カッタ回転数 150 rpm では、上の順に 0.03, 0.07 および 0.11 mm である), 振動を与えると、この切削こみの上に振動波形を画くことになるので、同じような考察が適用できる。

4.2 歯車精度に対する考察

一般に歯車のシェーピングにおいては、精度のよいカ

表 2 シェーピング前後のピッチ誤差の比較 (単位 μ)

	歯車番号	シェーピング	単一ピッチ誤差	隣接ピッチ誤差	累積ピッチ誤差
無 振 動	1	前	12	19	24
		後	5	8	13
	2	前	10	11	33
		後	7	8	18
	3	前	10	8	32
		後	7	6	24
振 動 ($a=20\mu$)	4	前	21	30	31
		後	13	18	24
	5	前	17	30	32
		後	14	25	24
	6	前	13	15	30
		後	10	9	32
	7	前	16	22	60
		後	9	11	34

ッタとのかみあい運動のみで、理想的な創成運動がとくに強制的に与えられないため、歯車精度については、一度に大幅な向上は期待できないのが普通であり、実際においては、いわゆる試行をくり返し、精度の向上がはかれる。本研究では、振動付加による影響を調べるのが目的であるので、前述のようにカッタを単に 2 往復させて比較しただけである。

表 2 はシェーピング前後のピッチ誤差の比較であるが、振動と無振動の差はあまり認められない。図 16 の歯形誤差測定例でも同じようなことが認められる。

4.3 運転時の騒音に対する考察

つぎにシェーピングした歯車を精度 JIS 0 級の親歯車とかみあわせて騒音の測定を行なった。この場合、親歯車の回転数を 300 rpm、歯面荷重を 1.5 kg とし、マイクロフォンの位置はかみあい点より 8 cm はなし、 60° の角度をとった。このようにして全騒音を測定した結果、普通のシェーピングを行なった歯車では、シェーピ

図 16 歯形誤差測定記録例

図 17 騒音の周波数分析結果

ング前より平均 6.6 db 程度低下した。そして 17 μ の振幅を与えて振動シェーピングした歯車では最大 11 db, 平均 8.3 db 低下し, 超音波振動付加による歯面あらさ改善の効果があらわれた。

図 17 は Brüel 社の周波数分析装置を用いて記録した騒音周波数と音圧の関係を振動振幅を変えてシェーピングした歯車について示したものである。これによれば, 振動シェーピングを行なった歯車において, 1000~10000 c/s の高周波数域での音圧が減少している。これは歯面上の細かい凹凸がとれてなめらかになったためと考えられる。

5. 結 論

歯車のシェーピングにおいて超音波振動を付加した場合の機構を解析し, あわせて実験を行なってその効果を調べた結果, つぎのことが確認された。

- (1) 工作条件によって歯面上に残される切削くいの波模様が変化し, 切削時のすくい角も時々刻々変化し, パニッシングする期間も存在する。この期間は歯面上の位置, 付加する振動振幅により相違がある。
- (2) 超音波振動を付加すれば, 普通のシェーピングの場合よりも歯面あらさが改善された。これらは上の解析結果から説明できる。とくに振幅を大きくする

と, 上記の波模様の重なりが広範囲になってその効果が増加する。これにともない, 運転時の騒音の減少が認められた。

- (3) 歯車の精度についてはシェーピングにより改善されるが, 精度のよいカッタとのかみあい運動のみで, とくに理想的な創成運動を与えないので, 超音波振動を付加しても普通の場合にくらべてとくに著しい差は認められなかった。

本研究を実施するにあたり, 前報の歯車の超音波振動ラッピングの場合とあわせ, 三菱重工業株式会社京都製作所工具課より種々ご支援いただいたことにつき, 記して感謝の意を表する次第である。

なお, 本研究の費用の一部は昭和 41 年度文部省科学研究費によった。

文 献

- 1) 岡本 隆, 小川昌平, 木村文秀, 横堀雄一: 歯車の超音波振動ラッピングについて, 精密機械, **32**, 11 (1966) 17.
- 2) 仙波正荘: 歯車, **8**, 日刊工業新聞社 (1965) 3229.
- 3) 新居信義, 植草正雄: シェーピング切削に関する 2, 3 の問題, 不二越技報, **11**, 3, 15.
- 4) W. Dudley: Gear Handbook, McGraw Hill Co., (1962) 18-1.
- 5) O. Rogg: Beitrag zur Frage des Zahnradschabens, VDI-Z, **98**, 8 (1956) 311.
- 6) 鳴滝良之助: ギヤシェーピング, Engg., **43**, 7 (1956) 528.