621.914.5.018 : 66.084 : 534.143

超音波振動歯切りに関する研究 (第1報)*

隈 部 淳 一 郎**

Study on Ultrasonic Gear Cutting (Part 1)

by Junichiro KUMABE

In this report, the effects of ultrasonic gear cutting by using the MICRON hobbing machine were investigated. The experiments were performed by a gear blank of ultrasonic vibration, which is chucked to the main spindle and conventional motion hob. The frequency is 29 400 c/s constant, amplitude variable and three kinds of gear blank of $M=0.75$ $Z=22$ are used, i.e., those of aluminum, brass and mild steel.

The results were as follows ;

- 1) At first, it was found that the revolving gear blank can be vibrated by using the carbon brush and brass slip ring without any spark trouble etc.
- 2) The type of chip was shear or flow type, but the conventional chip was all tear type.
- 3) The machined surface was very smooth.
- 4) After all, it was found is this ultrasonic gear cutting that the heigh frequency impact farce, which caused the work or tool to vibrate, was very important factor in the cutting process.

1. 目 的

バイトを超音波振動させて平削り切削すると、平削りのような低速切削でもバイトに構成刃先が附着せず、仕上面あらさがよくなりまた切削両端面へのばりが全然生じないことなどを既に報告した⁽¹⁾。

しかるに他の切削工具による切削様式においても切削が行われる限り、最も単純なバイトの切削機構と全く同一なのであるから、バイトにおいて超音波振動を与えて得られた諸効果は、あらゆる切削工具を超音波振動させた場合においても当然得られるはずで、おのおのの従来の切削現象をより以上に円滑ならしめるはずである。

その一つとして、歯切りを考えるに従来の歯切りの削り速度は一般におそいために構成刃先が生じやすく、仕上面あらさを悪くするのが特にねばい柔らかい材料に対して顕著であった。構造上やむを得ないかかる低速切削の歯車加工にあたって、ホブ、ギヤカタ、あるいは歯車素材をあらかじめ超音波振動させて切削すれば仕上面あらさが非常によくなり次の工程の研削、ラッピング効果も十分にあらわれて、精度および耐摩性をより以上向上させることができるなどきわめ

て意義深い効果が得られるであろうと考えられる。そこで、まず手もとにあるミクロンホブ盤を使用して平歯車切削を行い振動系、切削方法、効果について検討してみた。

2. 超音波振動歯切り法概略

平歯車をホブによって切削加工する方法は衆知のごとく第1図の要領で行われている。図のごときホブによる歯切加工にあたって振動方法は、超音波振動を有効的に作用させるには切削方向と同方向がよいという平削り基礎実験の結論⁽¹⁾に従って次の二とおりになる。

- 1) ホブにねじり振動と同時に回転運動を与え歯切りする方法。 2) ホブに回転のみを与え、歯車素材

第1図 ホブによる平歯車切削機構と振動方向

* 昭和 33 年 9 月 18 日 北陸地方講演会において講演，原稿受付 昭和 34 年 1 月 13 日。

** 正員，東京工業大学(東京都目黒区大岡山 1)。

を回転軸方向に縦振動させながら回転させて歯切りする方法。

ミクロン歯切盤の構造から言って、(1)の方式のホブのねじり振動系を取付けることは困難であるため(2)の方式を採用した。第2図によって説明すると、振動源にはやはり比較的容易に超音波振動が得られるニッケル磁わい振動子4を用い、歯車素材1を振動増幅用ホーン3の先端に取付けて歯車素材を振動方向矢印の方向に振動させ、この振動系をホブ盤回転軸にくわえて回転させ、励磁、励振用コード6がねじれないように回転軸に二つのスリップリング7、8をもうけ、これと接触するようにした静止炭素ブラシ9、10によって所定電流を供給して、歯車素材を回転と同時に回転軸方向に超音波振動させホブ2を従来どおり回転させホブ送り方向に送って歯車切削を行う。

3. 振動方向と切削方向について

a) ホブの切削機構からの考察 ホブ各切刃はテーブルの送りとともにフライスの刃先の運動同様にトロコイド曲線を描く。切削方向はこのトロコイド曲線の切線方向であるから、歯車素材回転軸方向に与えた振動方向とは正しくは同方向とはならずある傾斜角を有することになる。次にこの傾斜角について第1図のA-A断面である第3図において検討する。B点における速度は、テーブルの送り速度 $f = \overline{BE}$ 、 M_1B に直角なる方向のホブの円周速度 $v = \overline{BD}$ の二つがあり、この合成速度 $\overline{BF}$ の方向が切削方向で振動方向となす角 β は

$$\beta = \theta - \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

しかるに

$$\tan \phi = \frac{\overline{BG}}{\overline{EF} + \overline{EG}} = \frac{f \sin \theta}{v + f \cos \theta}$$

ゆえに

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{f}{v} \sin \theta}{1 + \frac{f}{v} \cos \theta} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

今ホブの直径を D とすれば

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{\frac{D}{2}} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(1) 式は

$$\beta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{\frac{D}{2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{f}{v} \sin \theta}{1 + \frac{f}{v} \cos \theta} \right) \quad \dots\dots (4)$$

第2図 超音波振動歯切り概略図

f : テーブルの送り mm/mn
 n : 回転数 rpm
 z : 歯数

第3図 切削方向と振動方向

しかるに $\frac{f}{v}$ の値を考えるに一般に $\frac{f}{v} \div 0$ である。ゆえに (4) 式は簡単になって

$$\beta = \theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{t}{\frac{D}{2}} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

すなわちホブの切線方向が切削方向であると考えて十分となる。最大傾斜角 θ_1 は第4図(a)に示すA点でホブの切込み t_1 によって変る。

$$\theta_{\max} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{t_1}{\frac{D}{2}} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

C点からA点に至る間は振動方向は切削方向に対して下向き方向に働く。これを正の方向とする。O点からC点までは逆に負の方向となる。

この負の傾斜角 φ は

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{f_z/2}{D/2}$$

f_z : ホブ 1 刃あたりの進み, f : テーブルの送り,

第 1 表 切削抵抗と傾斜角 θ との関係

θ°	0		5		10		15		20	
振幅 μ	P_H	P_V	P_H	P_V	P_H	P_V	P_H	P_V	P_H	P_V
3.8	kg 0.6	kg 0.3	kg 0.6	kg 0.25	kg 0.65	kg 0.25	kg 0.65	kg 0.3	kg 0.70	kg 0.3
7.5	0.6	0.28	0.65	0.2	0.6	0.2	0.70	0.3	0.65	0.3
11	0.65	0.3	0.65	0.25	0.55	0.25	0.60	0.25	0.55	0.2
15	0.60	0.25	0.65	0.25	0.55	0.2	0.60	0.28	0.60	0.25

第 2 表 切削比 r_c と傾斜角 θ との関係

θ°	0	5	10	15	20
振幅 μ					
3.8	0.85	0.75	0.85	0.85	0.85
7.5	0.85	0.8	0.80	0.90	0.90
11	0.90	0.75	0.85	0.95	0.95
15	0.90	0.80	0.90	0.95	0.95

第 4 図 振動方向と切削方向の傾斜角について

n : ホブの回転数, z : ホブの歯数とすれば

$$f_z = f/nz$$

であるから

$$\varphi = \sin^{-1} f/nzD \dots \dots \dots (7)$$

正, 負の最大傾斜角が (6), (7) 式によって算出される。

b) 傾斜振動方向の平削り実験による検討 O , C , A 点の瞬間切削機構は第 4 図 (b) に示すようなものと考えられ, O 点においては平削り二次元切削における切削方向に対してちょうど上向きに振動を与えながら切削することに相当する. C 点においては同方向で平削り基礎実験がそのまま適用され問題がない. 最大傾斜角 θ_1 の A 点では被切削材をたたきつけながら切削することになる. そこで平削り基礎実験を行ってこの傾斜角が切削比, 切削抵抗にいかなる影響を及ぼすかについて検討する。

c) 実験方法 φ なる角度で切削方向に対して上向きに振動させて切削することは実験装置の関係上困難である. 今この歯切り実験の切削条件 $f=2.4 \text{ mm/mn}$, $n=140 \text{ rpm}$, $z=15$, $D=31.5 \text{ mm}$ を代入して φ を算出してみると

$$\varphi = \sin^{-1} 0.000036 < 1^\circ$$

この φ はこのように無視し得る値なので, θ なる角度についてのみ検討することにした. 今 $t_1=1.6 \text{ mm}$ ($M=0.75$, $Z=22$ の切込量), $D=31.5 \text{ mm}$ として (6) 式から $\theta_{\max}$ を求めると $\theta_{\max}=26^\circ$ の値を得るので, 平削り実験の傾斜角として $\theta=0, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の 5 種類について実験を試みることにした. 切削抵抗の測定は既に報告した方法⁽¹⁾を用い, 第 5 図のようにして傾斜角を与えて切削条件として振動数 20 kc, 振幅 $3.8\mu, 7.5\mu, 11\mu, 15\mu$ と変え削り角 78° , 切削幅 1 mm, 切込み一定 0.05 mm, 削り速度 $v=0.98 \text{ m/mn}$ でアルミニウムについて実験した。

d) 実験結果 切削抵抗について主分力 $P_H \text{ kg}$, 背分力 $P_V \text{ kg}$ を求めると第 1 表のようになった. 傾斜角 0 の場合と振幅を変えてもだいたい同じ切削抵抗を示すことがわかった. 切削比を切りくず長さから算出すると第 2 表に示す結果が得られた. 傾斜角 5° においてわずかに切りくずが厚

くなるようであるが、だいたい一定と考えられる。なお削り角も切込みの変化によって変化する。しかしこの削り角が変化してもまた振動数が 20 kc, 30 kc, 40 kc と変化しても平均切削抵抗, 切削比にはほとんど関係せずだいたい同じ傾向を示すことが確かめられている⁽²⁾。

4. 超音波振動歯切り実験

a) 実験装置 具体的実験装置を第6図で主要寸法を加えながら説明を加える。水そう④をコレットチャック⑦で主軸に締めつけて、その尾部にベークライト円筒⑫を取付け、これに2枚の黄銅板⑬を圧入し、ホブ盤本体に取付ボルト⑨、ベークライト製座金⑩、および炭素ブラシ支持台⑪によって支持される炭素ブラシ⑬に接触させる。実験に使用した最大電流である励磁電流直流 8 A, 励振電流 8 A に対して黄銅板幅 14 mm, 直径 140φ, 2枚の黄銅板の間のベークライト板の板厚 11 mm, 炭素ブラシの幅 12 mm でなんら支障なく実験することができた。ただ黄銅板と炭素ブラシの接触抵抗にむらのないように両者のすり合わせを十分にし、励振電流の変動を防ぎ歯車素材の振動が一定するように注意した。このようにして磁わい振動子⑥を振動させ、ホーン②の先端に圧入、または銀ろうづけした歯車素材①に回転と同時に回転軸方向に任意の振幅の超音波振動を与えることができた。実験装置全景を第7図に示す。

b) 切削条件 歯車素材：アルミニウム (Al 99.2 %, Cu 0.5 %, Si 0.02 %, Mg, Mn なし), 黄銅 (Cu 61 %, Sn 0.9 %, Zn 残部, Pb 1.8 %), 炭素鋼 (0.2 %C, $H_{RB}=70$)。歯車形状： $M=0.75$, $Z=22$ 枚。歯切り条件：テーブルの送り速度 $f=2.4$ mm/mn, ホブの回転数 $n=140$ rpm, ホブの歯数 15 枚, 切込み $t_1=1.6$ mm (0.5 mm, 0.5 mm, 0.6 mm の3回にわける)。振動条件：振動数 29.4 kc, 振幅：アルミニウム材に対して 5, 6, 8, 10 μ , 黄銅, 炭素鋼材に対して 8 μ 。

第 5 図

第 6 図

前 景

背 景

第 7 図 実験装置全景

第 8 図 アルミニウム歯底の仕上面
あらさ

第 9 図 アルミニウムの切りくず

以上の切削条件で従来の振動させないホブ切削歯車との仕上面あらさ, 切りくずの形状, 歯面の顕微鏡的観測の比較をして検討した。

c) 結果 i) アルミニウム材に対して 仕上面あらさを日本光学触針式仕上面あらさ試験機によって歯車軸方向に歯底, 歯元, ピッチ円附近, 歯先を測定した。第 8 図に歯面のうちで一番仕上面あらさのあらい歯底を測定した結果を示す。従来の方法では 88μ というあらい仕上面あらさが, 超音波振動歯切りによって実に $5\sim 6\mu$ というなめらかな仕上面となることがわかった。

切りくずの形状を拡大写真によって第 9 図に示す。

超音波振動歯切りはいずれの振幅に対しても円滑な切削過程を物語るあざやかな切りくずを示している。これに対して従来の方法ではむしり取っただんご状のむしり形の切りくずを排出する。この切りくずによってはっきりと超音波振動歯切りの円滑な切削がうかがわれる。

次に歯面の顕微鏡的観測を行った。第 10 図にピッチ円附近の歯面の状態を示す。従来の方法では構成刃先を生じ歯面をむしり取ったちょうど雲海のごとき面に対して超音波振動歯切りでは振幅 10μ でややあれているが, 他の振幅ではいずれも一定ピッチの規則的衝撃のあとをみとめるあざやかな歯面を示し, にじ面

第 10 図 アルミニウムのピッチ円附近の顕微鏡写真

模様を呈する。

ii) 黄銅材に対して 歯面の状態を顕微鏡的観測したところ第 11 図に示す結果が得られた。図は歯底、ピッチ円附近を示すものである。従来の歯切りによる歯底をみるとホブ刃先で強く歯底を摩擦して無理やりに切削しているような歯面を呈するが、超音波振動歯切りでは歯底両すみで多少乱れるのみで、アルミニウム同様一定ピッチの規則的衝撃が作用して理想的な切削現象を行っていることを裏づける。ピッチ円附近の歯面においても同様で写真に示すような規則的のじょうこんを示し にじ面模様を呈する。

切りくず形状についてを第 12 図に示す。従来の切

削では図のように切りくずが小さく破砕するのが普通である黄銅に対して、超音波振動歯切りは理想的切りくずを排出する。従来の歯切りの際しても第 6 図で説明したように片持で、センタを押さなかったので切削抵抗によって歯車素材が逃げるのが切りくずを小さくさせている一原因でもある。この点を考えると、切削抵抗は測定しなかったが超音波振動歯切りはこの切りくず形状から今までの平削り基礎実験結果と対照して平均切削抵抗はきわめて小さいと考えられる。

iii) 炭素鋼に対して 炭素鋼について歯面の状態、切りくずの形状を第 13 図に示す。アルミニウム、黄銅同様切りくず形状が従来の切削と全然異なり、円

第 11 図 黄銅の歯面の顕微鏡写真

第 12 図 黄銅の切りくず

滑な理想的切削過程を証明し、その仕上面もむしり取った雲海のごとき凹凸の大きい歯面とは異なり、同じく にじ面模様を示す平滑な仕上面を呈する。

5. む す び

以上の諸結果から得られた結論は次のようになる。

- 1) 回転する歯車素材を超音波振動させる電気的供給部分の体系を明らかにし、また他の歯切盤への実施にあたっての設計資料を得ることができた。
- 2) 切削工具、あるいは加工物に超音波振動を与えて切削することがいかに切削機構を円滑にし効果

的ならしめるものかこの歯切実験によっても再認識されたところであるが、歯切盤として考えるとこの方法は今までの低速切削の欠点を完全に補うものとして新しい進展をなすものと思う。

- 3) 炭素鋼、黄銅、柔らかくてねばいアルミニウム材のいずれの加工物に対しても理想的切りくずを出し、その仕上面は平滑となる。
- 4) この実験では被切削材を圧入または銀ろうづけしたが、ねじ止めすることも可能であるから、歯幅の薄い歯切加工の場合など数枚合わせてねじで締めつけることによって所定発振が得られ超音波

第 13 図 炭素鋼の歯面および切りくず

振動歯切りができる。

次にこの要領で実験，検討のできる形削り，シェーピングを行って更に寸法精度，耐摩性など検討を加える予定である。

終りに本研究は，文部省機関研究費の一部によって行われ，終止御懇切なる御指導，御べん達をあおいでいる精密工学研究所所長 実吉純一先生ほか各先生に

心から感謝の意をささげ，更に直接実験に協力していただいた岩崎通信機会社，依託研究生高橋忠夫君にその労を謝する次第である。

文 献

- (1) 隈部，益子，機械学会論文集，**24**，138(昭 33-2)，109.
- (2) 隈部，東京秋期講演大会前刷，講演番号 127(昭 33-11-28).