U.D.C. 621.833.38

エレベータ用ウオームの歯形とウオーム歯車

景浦敬次郎* 久米 邦彌** 兼松 二郎***

Profile of Worm Gears for Elevator

By Keijiro Kageura, Kuniya Kume and Jiro Kanematsu
Taga Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

In the high class worm gear, teeth of the worm and of the worm-wheel must have the accurate profiles in order to obtain close mesh.

This is especially true when the lead angle of the worm is large. The writers studied the disk type cutter to obtain the precise tooth profile of the worm, and succeeded to formulize it theoretically.

Some modification was introduced to the cutter in consideration of its intrinsic operating condition.

The writers applied the worm thus improved and the worm-wheed finished by the serrated hob to the high class elevator with the satisfactory results in operation such as quiet, smooth running.

[I] 緒 言

ウォーム歯車の精密工作に関し筆者等は、ウォームホイールの工作にセレーテッドホブを使用して、ピッチ誤差を略所期の精度に向上し、歯形及び歯面の状態も著しく改善したことを報告した(1)。然し乍らウォーム歯車の性能は、ウォームホイールと、これに噛合うウォームの精度如何によることは勿論であつて、ウォームのピッチ及び歯形がホイールのそれに適合しなければ良好な製品を得ることはできない。筆者等の場合はホブはペンシル型砥石で研削し、ウォームはデイスク型カッタでは仕上げた。この際のホブ切りされたホイールの歯形に良く合つたウォーム歯形を得るためのカッタ形状を理論的に求め尚負荷時を考慮して歯形を若干修正し、又歯幅方向のクラウニングを与えるようウォームを製作した。その結果ウォームとホイールの歯当りは極めて良好で、歯車の音響、振動も著しく減少した。以下ウォームの精密工作及びホイールとの噛合状況の大要を述べ、諸賢の御参考に供したい。

[II] 歯溝直角断面に於て直線をなす歯形と、ペンシル、及びデイスク型工具で仕上げた歯形との比較

ウォームの歯形を取扱うに当つて、先ず歯溝直角断面に於て直線をなす歯形と、ペンシル及びデイスク型工具で仕上げた歯形との比較を軸断面に就て行つた。

(1) 歯溝直角断面に於て直線をなす歯形の軸断面形状

これに関しては既に種々の論文(2)も発表されているが論旨を進めるため簡単に記述する。歯溝直角断面に於て直線をなすウォームに就て、座標軸を**第1図**の如く定めれば、直線 A B の方程式は

$$\frac{x-r_0}{\cos\alpha}=\frac{y}{\sin\alpha\sin\beta}=\frac{z}{\sin\alpha\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

今ウォーム軸に固定して X、Y、Z、座標を考え、x、y、z 座標が任意の旋回角 θ の位置にあるものとすれば（右捻れの場合を考える、以下同じ）両座標の間には次の関係がある。

$$x=X\cos\theta-Y\sin\theta$$
$$y=X\sin\theta+Y\cos\theta$$
$$z=Z-b\theta$$

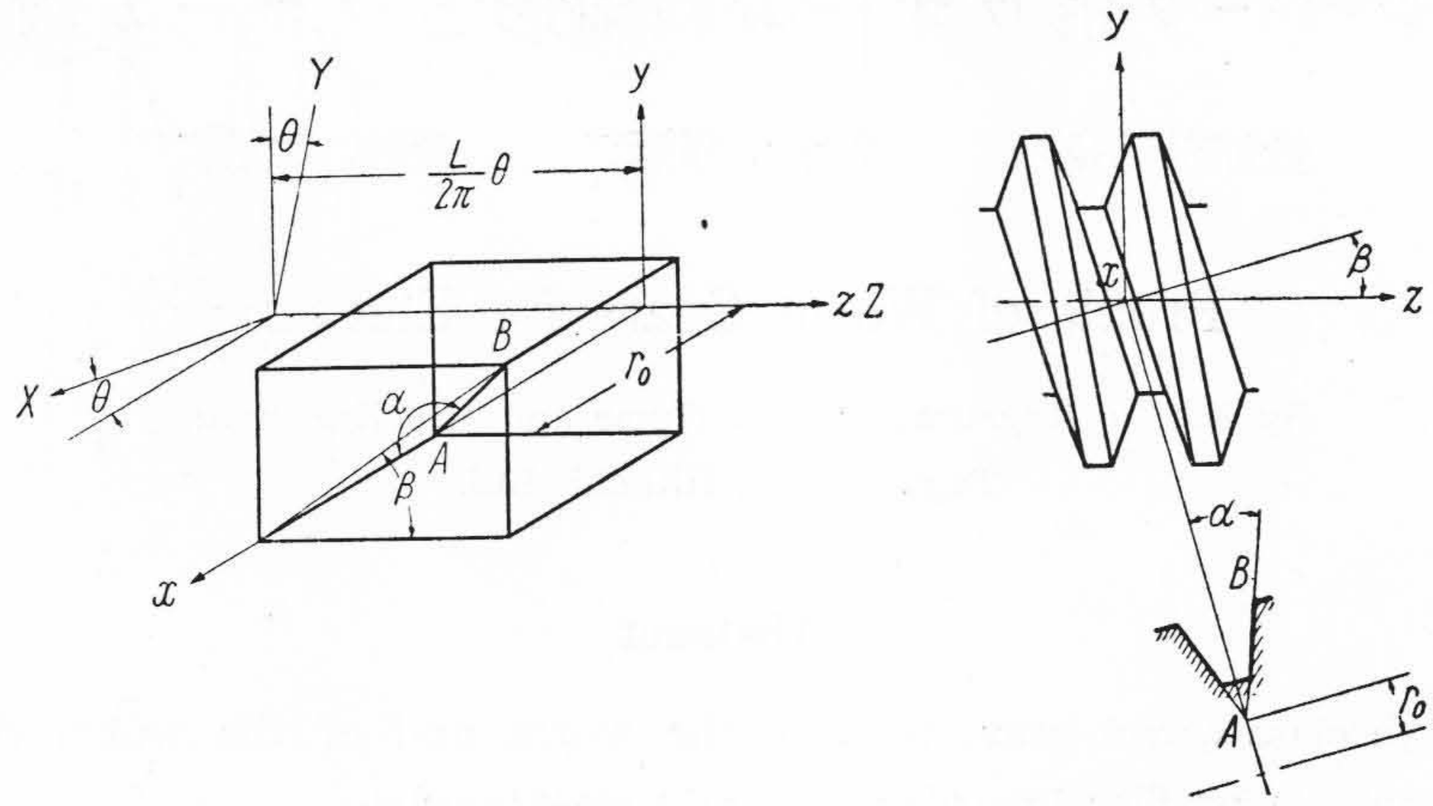
但し $b=\dfrac{L}{2\pi}$

L ：ウォームのリード

これを(1)式に代入すれば

$$\frac{X\cos\theta-Y\sin\theta-r_0}{\cos\alpha}=\frac{X\sin\theta+Y\cos\theta}{\sin\alpha\sin\beta}=\frac{Z-b\theta}{\sin\alpha\cos\beta} \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

* ** *** 日立製作所多賀工場



第 1 図　ウ オ ー ム の 座 標
Fig. 1.　Co-Ordinate of Worm

(2) 式がＡＢを母線とするねじ面の方程式、即ち歯溝直角断面に於て直線歯形をなすウォームを表わすものである。次にこれの軸断面歯形を求めるには、(2) 式において

$$Y=0$$

とおき解けば (3) 式を得る。

$$\left.\begin{aligned} X&=\frac{r_0\sin\alpha\sin\beta}{\cos\theta\sin\alpha\sin\beta-\sin\theta\cos\alpha}\\ Z&=b\theta+X\sin\theta\cot\beta\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

これより

$$\theta=\sin^{-1}\left[\frac{\sin\alpha\sin\beta}{(1-\sin^2\alpha\cos^2\beta)X}\{-r_0\cos\alpha\pm\sqrt{r^2_0\cos^2\alpha-(1-\sin^2\alpha\cos^2\beta)(r^2_0-X^2)}\}\right]\cdots\cdots(4)$$

(3)、(4) 式より軸断面歯形曲線を求め得る。尙この歯形曲線における任意の点の勾配は次式で表わされる。

$$\frac{dX}{dZ}=\frac{\dfrac{dX}{d\theta}}{\dfrac{dz}{d\theta}}\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

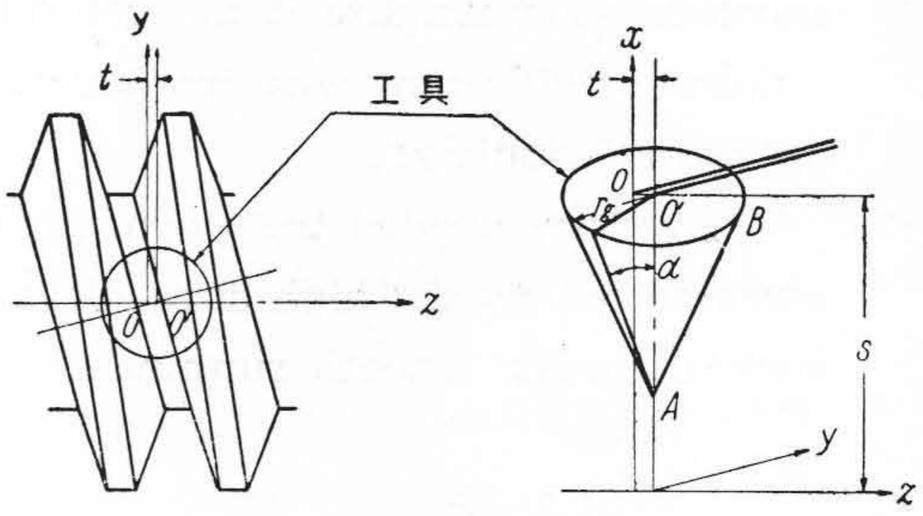
$$\left\{\begin{aligned}\frac{dX}{d\theta}&=\frac{X(\sin\theta\sin\alpha\sin\beta+\cos\theta\cos\alpha)}{\cos\theta\sin\alpha\sin\beta-\sin\theta\cos\alpha}\\ \frac{dZ}{d\theta}&=b+\frac{dX}{d\theta}\sin\theta\cot\beta+X\cos\theta\cot\beta\end{aligned}\right.$$

尙反対側の歯面に就ては全く同様である。

2(ハ) ペンシル型工具により仕上げられた歯形の軸断面形状

筆者等はウォームホイール切削用セレーテッドホブをペンシル型砥石で仕上げた。このホブ歯形をウォームのそれに合せることが必要で茲にその解析を試みた。

座標軸を**第 2 図**の如く取り、工具は図の如き位置にあるものとする。図に於てＡＢを母線とする円錐をペンシル型工具と考えれば、x、y、z 座標における円錐面の方程式は



第 2 図　ペンシル型工具
Fig. 2.　Pencil Type Tool

$$y^2+(z-t)^2=\{r_g+(x-s)\tan\alpha\}^2\cdots\cdots\cdots(6)$$

今ウォーム軸に固定して X、Y、Z なる座標を考え、x、y、z 座標が旋回角 θ の位置にあるとすれば

$$x=X\cos\theta-Y\sin\theta$$
$$y=X\sin\theta+Y\cos\theta$$
$$z=Z-b\theta$$

これを (6) 式に代入すれば

$$(X\sin\theta+Y\cos\theta)^2+(Z-b\theta-t)^2=\{r_g+(X\cos\theta-Y\sin\theta-s)\tan\alpha\}^2\cdots\cdots(7)$$

(7) 式がペンシル型工具の面を表わす。この場合 θ を媒介変数として得られる包絡面が、工具のねじ運動によつて創成されるねじ面を与える。

$\dfrac{\partial(7)}{\partial\theta}$ を求めると

$$(X\sin\theta+Y\cos\theta)(X\cos\theta-Y\sin\theta)-b(Z-b\theta-t)+\{r_g+(X\cos\theta-Y\sin\theta-s)\tan\alpha\}(X\sin\theta+Y\cos\theta)\tan\alpha=0\cdots\cdots(8)$$

(7)(8)式がペンシル型工具によつて創成されるねじ面

を表わす。次にこれの軸断面歯形を求めるには、(7)(8)式において

$$Y=0$$

とおき θ を消去すればよい。

$$X^2\sin^2\theta+(Z-b\theta-t)^2$$
$$=\{r_g+(X\cos\theta-s)\tan\alpha\}^2 \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$
$$X^2\sin\theta\cos\theta-b(Z-b\theta-t)$$
$$+\{r_g+(X\cos\theta-s)\tan\alpha\}X\sin\theta\tan\alpha=0 \cdots (10)$$

(9)(10) 式を $(Z-b\theta-t)$ について解けば

$$Z-b\theta-t=\pm\sqrt{\{r_g+(X\cos\theta-s)\tan\alpha\}^2-X^2\sin^2\theta}$$
$$Z-b\theta-t=\frac{\{r_g+(X\cos\theta-s)\tan\alpha\}X\sin\theta\tan\alpha+X^2\sin\theta\cos\theta}{b}$$

よつて

$$\pm b\sqrt{\{r_g+(X\cos\theta-s)\tan\alpha\}^2-X^2\sin^2\theta}$$
$$=\{r_g+(X\cos\theta-s)\tan\alpha\}X\sin\theta\tan\alpha+X^2\sin\theta\cos\theta$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

(11) 式において X の任意の値に対する θ が決定されるから、これに対応する Z の値も決定する。従つて求める歯形曲線が得られる。反対側歯面については、全く同様にして求めることができる。

(3) デイスク型工具により仕上げられた歯形の軸断面形状

一般の場合として**第3図**の如く、工具軸はウォームの任意の進み角 β だけ捻つて取付けられ、更に γ だけ傾いた状態でウォームを創成する場合について考える。筆者等はこの状態でウォームを仕上げた。**第3図**に示す如く座標軸を取り、デイスク型工具を、ＡＢを母線とする円錐面と考えれば、x'''、y'''、z''' 座標に於ける方程式は

$$x'''^2+y'''^2=(r_g-z'''\cot\alpha)^2 \cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

次に座標を $(x'''、y'''、z''')$ から $(x''、y''、z'')\rightarrow(x'、y'\ z')\rightarrow(x、y、z)\rightarrow(x_0、y_0、z_0)$ え順次変換して行けば、x'''、y'''、z''' 座標と x_0、y_0、z_0 座標との間には次の関係がある。

$$\begin{cases} x'''=(x_0-c)\cos\gamma+(z_0\cos\beta+y_0\sin\beta)\sin\gamma \\ y'''=y_0\cos\beta-z_0\sin\beta \\ z'''=(z_0\cos\beta+y_0\sin\beta)\cos\gamma-(x_0-c)\sin\gamma-e \end{cases}$$

今ウォーム軸に固定して X、Y、Z なる座標を考え、x_0、y_0、z_0 座標が旋回角 θ の位置にありとすれば

$$\begin{cases} x_0=X\cos\theta-Y\sin\theta \\ y_0=X\sin\theta+Y\cos\theta \\ z_0=Z-b\theta \end{cases}$$

これ等の関係を (12) 式に代入すれば

$$[(X\cos\theta-Y\sin\theta-c)\cos\gamma+\{(Z-b\theta)\cos\beta$$
$$+(X\sin\theta+Y\cos\theta)\sin\beta\}\sin\gamma]^2$$
$$+\{(X\sin\theta+Y\cos\theta)\cos\beta-(Z-b\theta)\sin\beta\}^2$$
$$=[r_g-\{(Z-b\theta\cdot\cos\beta+X\sin\theta+Y\cos\theta\cdot\sin\beta)\cos\gamma$$
$$-(X\cos\theta-Y\sin\theta-c)\sin\gamma-e\}\cot\alpha]^2 \cdots (13)$$

(13) 式はデイスク型工具の面を表わす方程式である。而して θ を媒介変数として得られる包絡面が工具のねじ運動によつて創成されるねじ面を与える。

$\frac{\partial(13)}{\partial(\theta)}$ を求めると

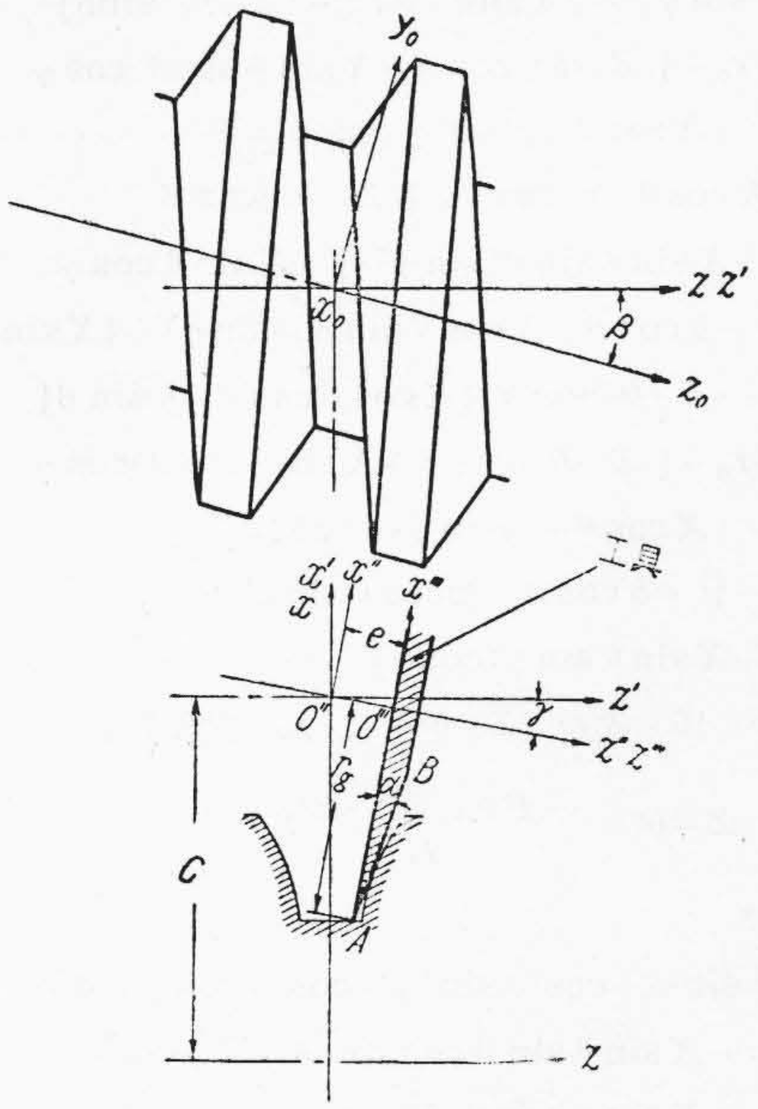
$$[(X\cos\theta-Y\sin\theta-c)\cos\gamma+\{(Z-b\theta)\cos\beta$$
$$+(X\sin\theta+Y\cos\theta)\sin\beta\}\sin\gamma]$$
$$\cdot[-(X\sin\theta+Y\cos\theta)\cos\gamma+\{-b\cos\beta$$
$$+(X\cos\theta-Y\sin\theta)\sin\beta\}\sin\gamma]$$
$$+\{(X\sin\theta+Y\cos\theta)\cos\beta-(Z-b\theta)\sin\beta\}$$
$$\cdot\{(X\cos\theta-Y\sin\theta)\cos\beta+b\sin\beta\}$$
$$=[r_g-\{(z-b\theta\cdot\cos\beta+X\sin\theta+Y\cos\theta\cdot\sin\beta)\cos\gamma$$
$$-(X\cos_\theta-Y\sin\theta-c)\sin\gamma-e\}\cot\alpha]$$
$$\cdot[-\{(-b\cos\beta+X\cos\theta-Y\sin\theta\cdot\sin\beta)\cos\gamma$$
$$+(X\sin\theta+Y\cos\theta)\sin\gamma\}\cot\alpha] \cdots\cdots\cdots (14)$$

(13)(14) 式がデイスク型工具によつて創成されるねじ面を表わす。次にこれの軸断面歯形を求めるには、(13)(14) 式において

$$Y=0$$

とおき θ を消去すれば良い。

$$[(X\cos\theta-c)\cos\gamma+\{(Z-b\theta)\cos\beta+X\sin\theta\sin\beta\}$$



歯溝直角断面

第 3 図　ディスク型工具
Fig. 3.　Disc Type Tool

$$\cdot\sin\gamma]^2+\{X\sin\theta\cos\beta-(Z-b\theta)\sin\beta\}^2$$
$$=[r_g-\{(Z-b\theta\cdot\cos\beta+X\sin\theta\sin\beta)\cos\gamma$$
$$-(X\cos\theta-c)\sin\gamma-e\}\cot\alpha]^2\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$
$$[(X\cos\theta-c)\cos\gamma+\{(Z-b\theta)\cos\beta$$
$$+X\sin\theta\sin\beta\}\sin\gamma]\cdot\{-X\sin\theta\cos\gamma$$
$$+(-b\cos\beta+X\cos\theta\sin\beta))\sin\gamma\}+\{X\sin\theta\cos\beta$$
$$-(Z-b\theta)\sin\beta\}\{X\cos\theta\cos\beta+b\sin\beta\}$$
$$=[r_g-\{(Z-b\theta\cdot\cos\beta+X\sin\theta\sin\beta)\cos\gamma$$
$$-(X\cos\theta-c)\sin\gamma-e\}\cot\alpha]$$
$$\cdot[-\{(-b\cos\beta+X\cos\theta\sin\beta)\cos\gamma$$
$$+X\sin\theta\sin\gamma\}\cot\alpha]\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

(15)(16) 式を $(Z-b\theta)$ について解けば

$$Z-b\theta=\frac{-F\pm\sqrt{F^2-EG}}{E}$$

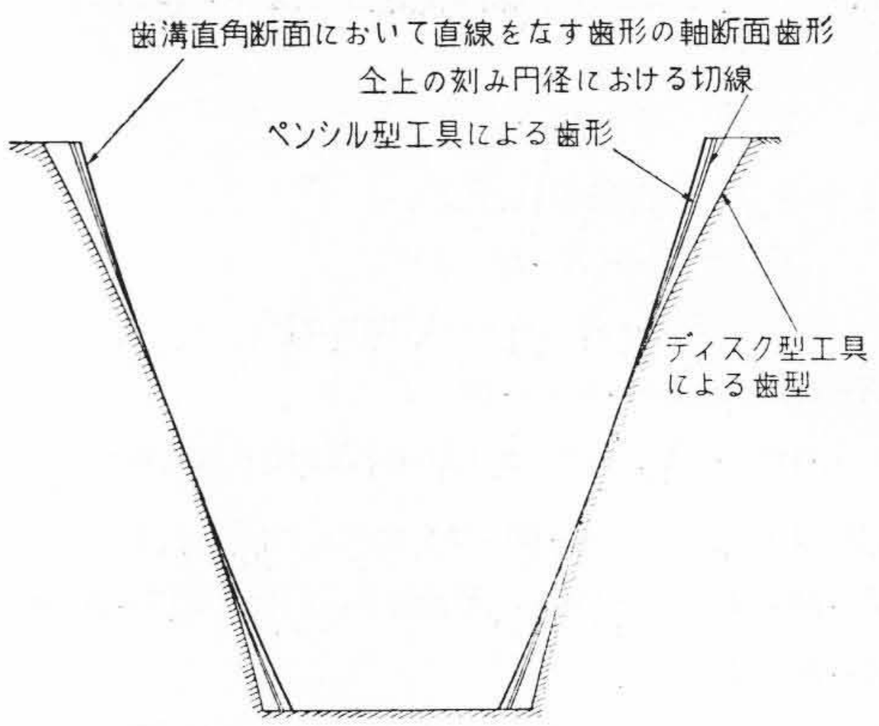
茲に

$$E=\sin^2\beta+\cos^2\beta\sin^2\gamma-\cos^2\beta\cos^2\gamma\cot^2\alpha$$
$$F=-X\sin\theta\sin\beta\cos\beta\cos^2\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+X\cos\theta\cos\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+(r_g+e\cos\alpha)\cos\beta\cos\gamma\cot\alpha$$
$$-c\cos\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$G=X^2\sin^2\theta(\cos^2\beta+\sin^2\beta\sin^2\gamma-\sin^2\beta\cos^2\gamma\cot^2\alpha)$$
$$+X^2\cos^2\theta(\cos^2\gamma-\sin^2\gamma\cot^2\alpha)$$
$$+2X^2\sin\theta\cos\theta(\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma$$
$$+\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma\cot^2\alpha)$$
$$+2X\sin\theta\{-c\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma+(r_g+e\cot\alpha)$$
$$\cdot\sin\beta\cos\gamma\cot\alpha-c\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma\cot^2\alpha\}$$
$$+2X\cos\theta\{-c\cos^2\gamma-(r_g+e\cot\alpha(\sin\gamma\cot\alpha$$
$$+c\sin^2\gamma\cot^2\alpha\}$$
$$+c^2\cos^2\gamma-(r_g+e\cot\alpha)^2+2c(r_g+e\cot\alpha)$$
$$\cdot\sin\gamma\cot\alpha-c^2\sin^2\gamma\cot^2\alpha$$

$$Z-b\theta=\frac{H}{K}$$

茲に

$$K=X\sin\theta\cos\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+X\cos\theta\sin\beta\cos\beta\cos^2\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+b(\sin^2\beta+\cos^2\beta\sin^2\gamma-\cos^2\beta\cos^2\gamma\cot^2\alpha)$$
$$H=-X^2\sin^2\theta\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+X^2\cos^2\theta\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+X^2\sin\theta\cos\theta(\cos^2\beta-\cos^2\gamma+\sin^2\beta\sin^2\gamma$$
$$-\sin^2\beta\cos^2\gamma\cot^2\alpha+\sin^2\gamma\cot^2\alpha)$$
$$+X\sin\theta\{b\sin\beta\cos\beta\cos^2\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+(r_g+e\cot\alpha)\sin\gamma\cot\alpha+c(\cos^2\gamma-\sin^2\gamma\cot^2\alpha)\}$$
$$+X\cos\theta\{-b\cos\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$-c\sin\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$
$$+(r_g+e\cot\alpha)\sin\beta\cos\gamma\cot\alpha\}$$
$$+bc\cos\beta\sin\gamma\cos\gamma(1+\cot^2\alpha)$$



第 4 図　歯　形　の　比　較
Fig. 4. Comparison of Tooth Profiles

$$-b(r_g+e\cot\alpha)\cos\beta\cos\gamma\cot\alpha$$

よつて

$$\frac{-F\pm\sqrt{F^2-EG}}{E}=\frac{H}{K}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

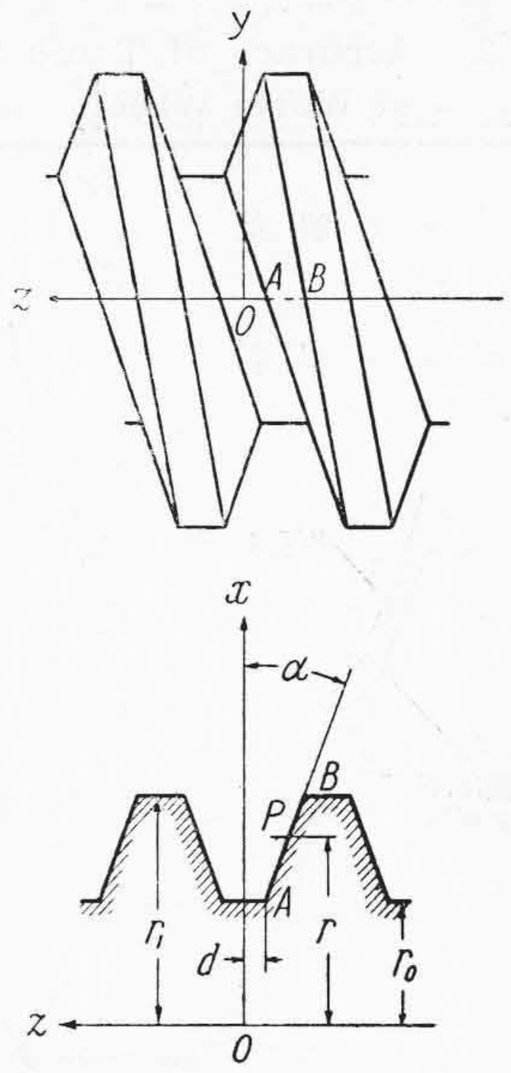
(17) 式において X の任意の値に対する θ が決定されるから、これに対応する Z の値も求められる。従つて求める歯形曲線が得られる。θ の値は試索法により求める。この方法は甚だ厄介に見えるが、実際にはそれ程困難ではない。反対側歯面についても同様にして求めることができる。

(4) 歯 形 の 比 較

上述の方法により計算せる結果を、一例につき示せば**第 4 図**の如くである。即ち歯溝直角断面に於て直線をなす歯形の、軸断面歯形は中凹である。ペンシル型工具による軸断面歯形は、直線に近い中凹で実際上直線と見做して差支えない。デイスク型工具による歯形は直線より大きく偏倚した中凸で、その値は無視できない場合が多い。

[III]　デイスク型ウオームカッタ

上述の結果によつて明らかな如く、ホブ又はウォームの歯形は、それを工作する工具により著しく異つたものになる。従つて両者を各別箇の工具で仕上げる場合には、その歯形を合せるため、何れか一方の工具輪廓を修正しなければならない。筆者等の場合はデイスク型工具の輪廓を修正して歯形を合せた。その方法は工作が最も容易で、然も精度を上げ得られる。前述の如くセレーテッドホブをペンシル型砥石で研削した場合、その軸断面歯形は直線と考えて差支えなく、筆者等が行つた実験の場合、直線よりの偏倚は数ミクロンであつた。従つてウォームの軸断面歯形が直線をなすよう、デイスク型カッタの輪廓を修正すれば良い。尚実際のカッタ製作に当つては、ウォーム負荷時を考慮して、歯形を若干修正し、歯幅方



第 5 図　軸断面歯形が直線なるウォーム
Fig. 5. Worm Having a Straight-line Generatrix that Passes through the Axis of the Worm

向にも和栗博士提案の方式によるクラウニングを与えるようカッタ並びにウォームを設計製作した。

(1) 軸断面歯形が直線をなすウオームを切削するための工具輪廓

工具の輪廓を求めるには奥島氏[3]の方法を用いた。今軸断面に於て直線歯形を有するウォームについて、**第 5 図**の如く座標軸を取れば、ねじ面の方程式としては次式を得る。

$$\left.\begin{aligned} x&=r\cos\theta \\ y&=r\sin\theta \\ z&=b\theta-d-(r-r_0)\tan\alpha \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

r, θ ：媒介変数

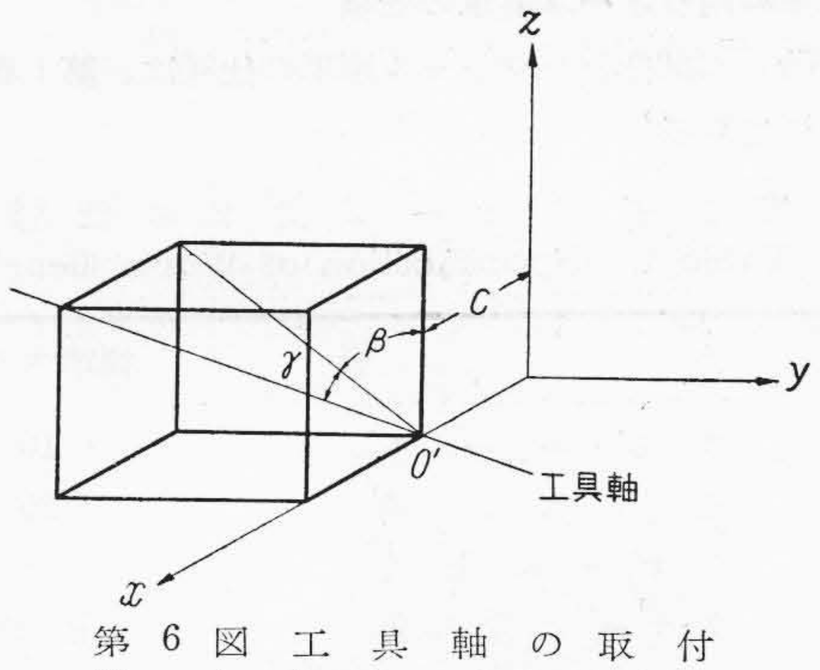
$$r_1 \geqq r \geqq r_0$$

$$+\infty \geqq \theta \geqq -\infty$$

このねじ面の一点における法線の方程式は、X、Y、Z を流通座標とすれば

$$\left.\begin{aligned} X-r\cos\theta&=\frac{1}{r}\{Z-b\theta+d+(r-r_0)\tan\alpha\} \\ &\cdot(b\sin\theta+r\tan\alpha\cos\theta) \\ Y-r\sin\theta&=\frac{1}{r}\{Z-b\theta+d+(r-r_0)\tan\alpha\} \\ &\cdot(r\tan\alpha\sin\theta-b\cos\theta) \end{aligned}\right\} \cdots(19)$$

上式に於て r を一定にして θ を変化すれば一つの曲面を表わすことになる。一方工具軸を [II] の(3)の如く取るものとすれば、工具軸は**第 6 図**を以て示され、その方程式は次の如くなる。



第 6 図　工具軸の取付
Fig. 6. Setting of Tool Axis

$$\left.\begin{aligned} X-c&=Z\frac{\tan\gamma}{\cos\beta} \\ Y&=-Z\tan\beta \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

(19) (20) 両式より θ を求めれば、θ は切削線上の一点の座標を決定する。よつて両式より X、Y、Z を消去すれば

$$P\sin\theta\cdot\theta+Q\cos\theta\cdot\theta-R\sin\theta-S\cos\theta+(b+c\tan\beta)=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

$$P=\frac{b^2\tan\beta}{r}+b\frac{\tan\alpha\tan\gamma}{\cos\beta}$$

$$Q=b\tan\alpha\tan\beta-\frac{b^2\tan\gamma}{r\cos\beta}$$

$$R=\left(\frac{b}{r}\tan\beta+\frac{\tan\alpha\tan\gamma}{\cos\beta}\right)\{d+(r-r_0)\tan\alpha\}+r\frac{\tan\gamma}{\cos\beta}-c\tan\alpha$$

$$S=\left(\tan\alpha\tan\beta-\frac{b\tan\gamma}{r\cos\beta}\right)\{d+(r-r_0)\tan\alpha\}+\frac{bc}{r}+r\tan\beta$$

(21) 式より任意の r に対する θ の値が決定するから、この r、θ を用いて (18) 式より切削線上の一点の座標が求められる。よつて r を r_0 より r_1 まで変化して行けば、これに対応する切削線上の点が総て求められる。次に切削線を工具軸の周りに回転して得られる回転体即ち工具輪廓を求めるには、**第 6 図**に於て Z 軸を工具軸に変換した直角座標を考え、切削線上の点をこの新座標で表わす。新旧座標の関係は x'、y'、z' を工具軸を z 軸とする新座標とすれば

$$\left.\begin{aligned} x'&=(x-c)\cos\gamma-(z\cos\beta-y\sin\beta)\sin\gamma \\ y'&=y\cos\beta+z\sin\beta \\ z'&=(x-c)\sin\gamma+(z\cos\beta-y\sin\beta)\cos\gamma \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(22)$$

よつて工具輪廓は次式で表わされる。

$$\sqrt{x'^2+y'^2}=f(z')$$

反対側の歯面についても同様にして求めることができる。

(2) 実験用ウオーム歯車の仕様

実験用に試作したウォーム歯車の仕様は、**第1表**の如きものである。

第 1 表 ウ オ ー ム 歯 車 の 仕 様
Table 1. Specification of Worm Gear

歯形	標準スタブ
モ ジ ュ ー ル	10
圧 力 角	20°
ウ ォ ー ム 条 数	3
ウ ォ ー ム 進 み 角	右 18°
右ウオームホイール歯数	63

(3) デイスク型カッタの製作

以上述べた方法により所要のカッタ輪廓を計算し、これにごく僅か、歯丈方向の歯形修正を行う。尙前述の計算に先立つて、ウォームのリードをホブのそれより若干延ばして、歯幅方向のクラウニングを与えるよう、カッタ並びにウォームの設計を行う。かくして最終的のカッタ輪廓を決定するのである。カッタの製作に当つては、先ず精密な板ゲージを作る。次に光学的做研削盤によつて、ゲージに合せつつカッタ歯形を研削する。カッタは僅かのランドを残して二番取りを行い完成する。この方法により、圧力角に於て最大誤差 2′ の精度を得ることができた。**第7図**にその形状を示す。

[IV] ウオームの工作

ウォームの歯形は荒仕上、及び仕上用カッタにより切削する。仕上切削は数回に分けて行い、最小の加工歪と最良の仕上面を得るようにする。ウォームのジャーナル部と歯切時の回転中心との偏心は、最小に止めるよう注意することが必要である。かくして仕上げたウォームの精度は、隣接ピッチ誤差で 10μ であつた。修正カッタの効果をみるため、本カッタで仕上げたウォームと、直線歯形の無修正カッタによるものとの軸断面形状を測定してみた。その結果は**第8図**の如くである。直線歯形の無修正カッタによる場合は、歯先、歯元における歯形の偏倚が大きく、ホイールと組合せた場合、歯当りが甚だしく悪くなることが予知される。前述の如き修正カッタによる場合は図の如く、所要の軸断面直線歯形に非常に近いものが得られた。

[V] 噛合及び運転試験

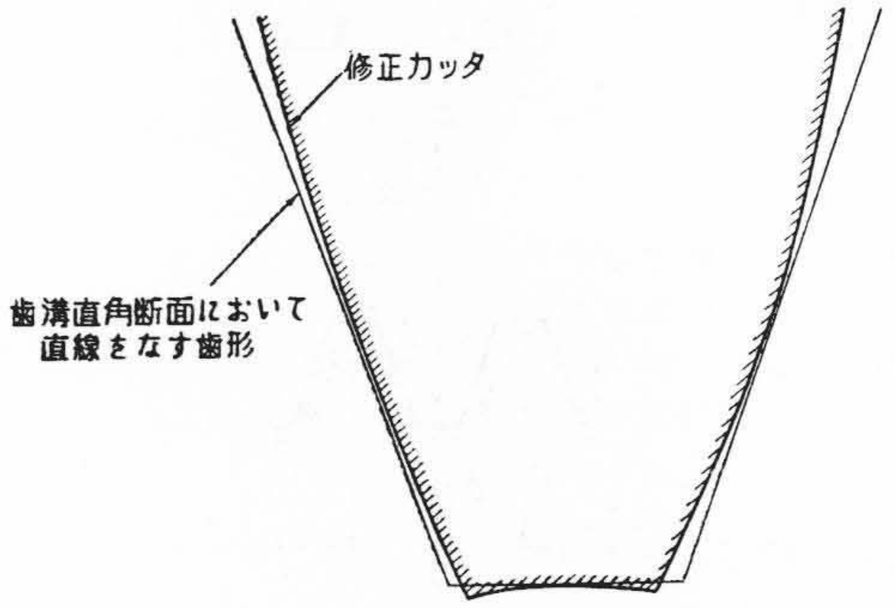
上述のウォームを、セレーテッドホブにて仕上げたホイールに組合せて、噛合及び運転試験を行つてその効果をみた。

(1) 噛 合 試 験

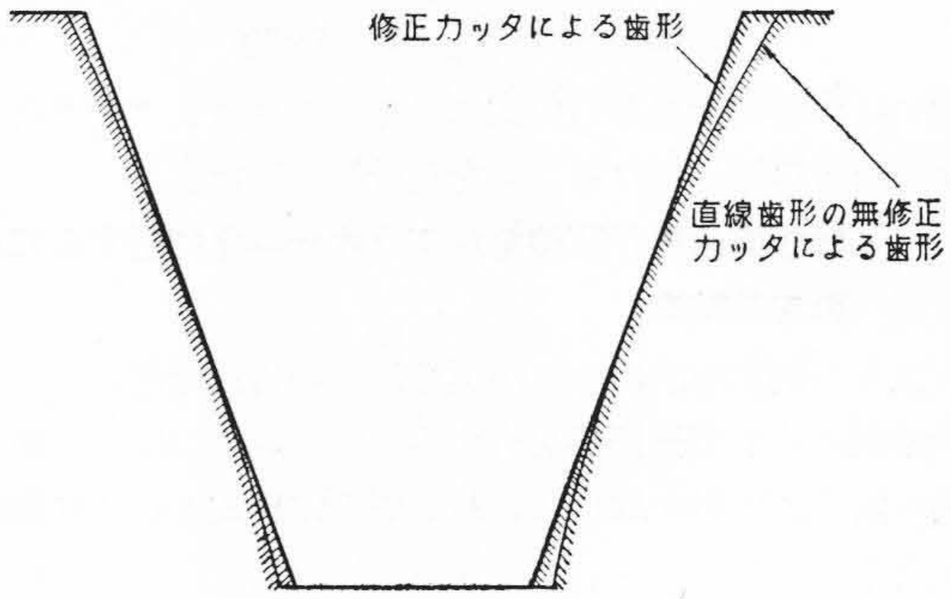
第 2 表 ウォームホイールのピッチ精度
Table 2. Accuracy of Tooth Spacing of Worm Wheel

単一ピッチ誤差	最　大	+20
	最　小	−22
隣接ピッチ誤差		32

単位 μ



第 7 図 修 正 カ ッ タ の 輪 廓
Fig. 7. Profile of Corrected Cutter



第 8 図 ウ オ ー ム の 軸 断 面 歯 形
Fig. 8. Axial Section of Worm

直線歯形の無修正カッタで仕上げたウォームと、前述の修正カッタにより仕上げたものとを作り、両者を同一ウォームホイールに噛合せて歯当りの状況を調べた。

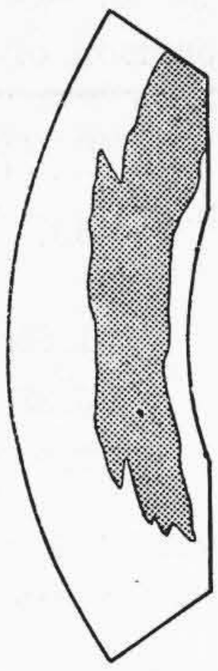
（A） 供試ウォームホイールの精度

第2表の如くである。

（B） ウォームホイールの歯当り

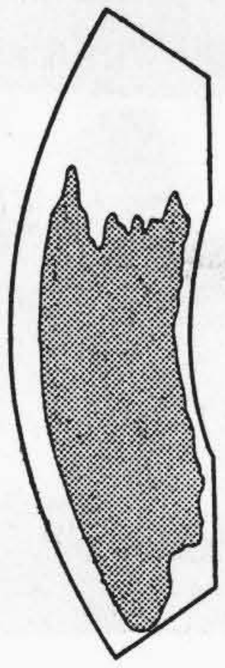
直線歯形の無修正カッタによるウォームの場合のホイールの歯当りは、**第9図**の如くで歯丈方向に狭く、前述のウォーム歯形の偏倚が悪影響を及ぼしていることが明瞭である。修正カッタによるウォームの場合は、**第10図**の如くで、歯丈方向は略一杯に当り、理想的な当りを示している。しかもウォーム及びホイールの精度が良いため、ホイールの各歯は均一な歯当りとなつている。**第11図**に後者の歯当りの状況を写真で示す。

（C） ウォームの歯当り



第 9 図　直線歯形の無修正カッタによるウオームの場合のウオームホイールの歯当り

Fig. 9.　Tooth Bearing of the Worm Wheel Meshed with a Worm Cut by the Conventional Cutter



第 10 図　修正カッタによるウオームの場合のウオームホイールの歯当り

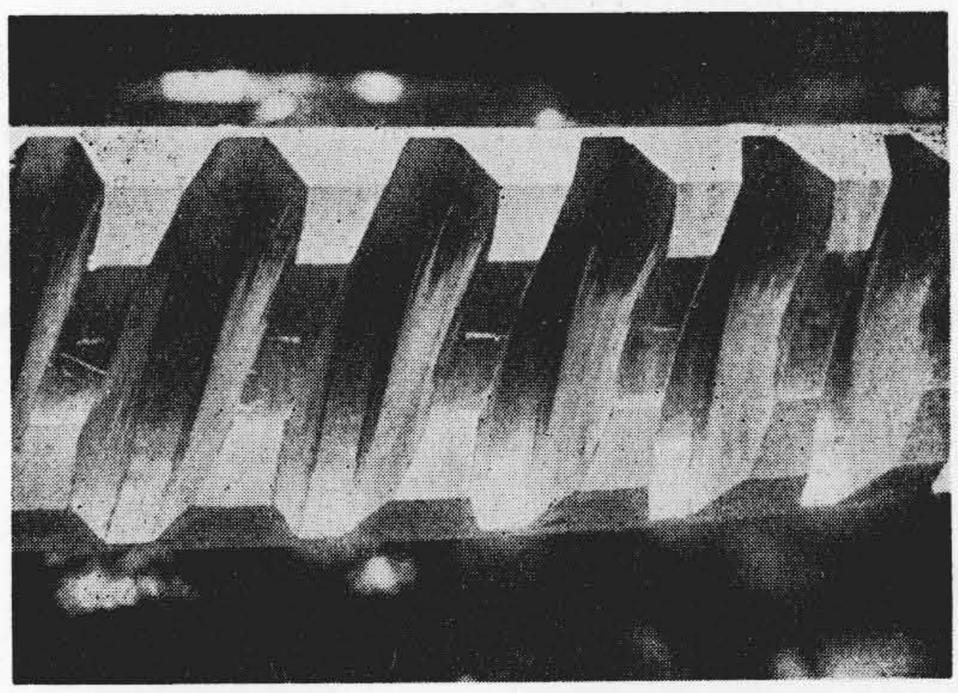
Fig. 10.　Tooth Bearing of the Worm Wheel Meshed with a Worm Cut by the Corrected Cutter

上述の状態におけるウォームの当りを調べた。ウォーム各条の当りの長さを角度で表わしたものが**第 12、13 図**である。これで明らかな如く修正しないカッタの場合は接触率が短かく、唯1組の歯が噛合つている場合が生じている。一方修正カッタによれば接触率が最大限まで増大し、常に2組以上の歯で噛合つており、従つて振動、音響の防止に非常な好影響を与えることが期待されるのである。

(2) 運 転 試 験

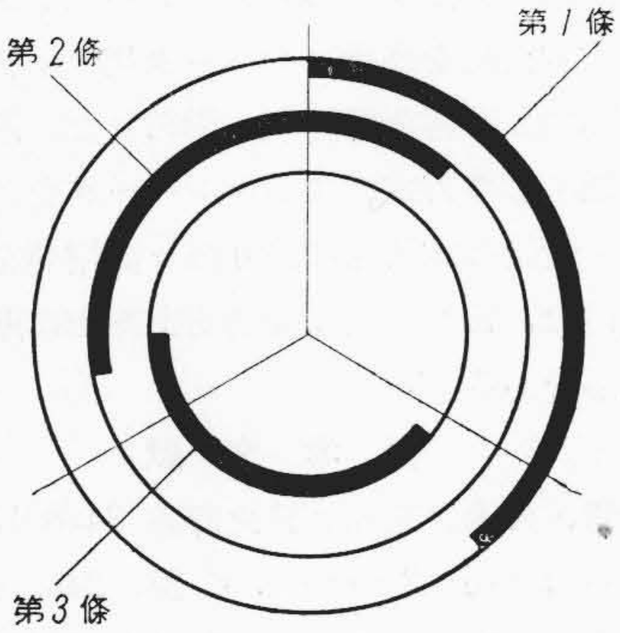
(A)　負荷運転下のウォームホイールの歯当り

修正カッタで仕上げたウォームと、セレーテッドホブで仕上げたウォームホイールとで組立てたウォーム歯車を、正規負荷下で $1^1/_2$ 時間運転した後、ウォームホイールの歯当りを調べた。その結果は**第 14 図**の如くであつて、これが負荷運転下の歯の接触状態を示すものである。**第 10、11 図**に示した歯当りが歯幅のウォーム入口側に延



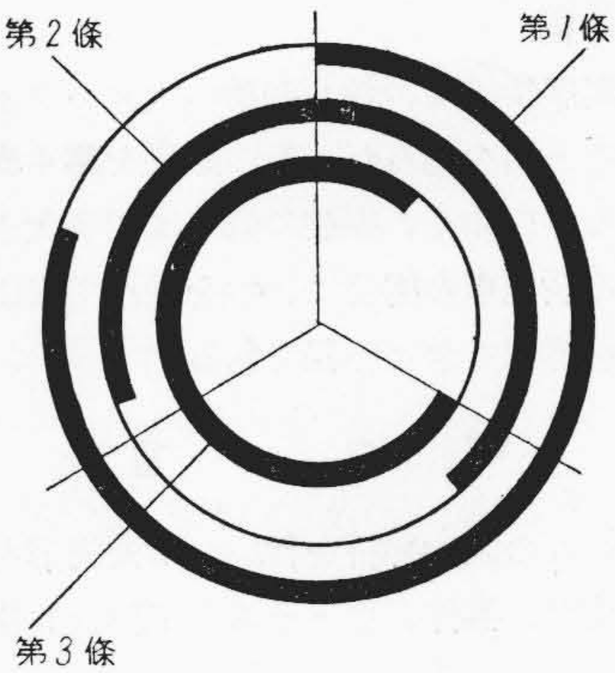
第 11 図　修正カッタによるウオームの場合のウオームホイールの歯当り

Fig. 11.　Tooth Bearing of the Worm Meshed with a Worm Cut by the Corrected Cutter



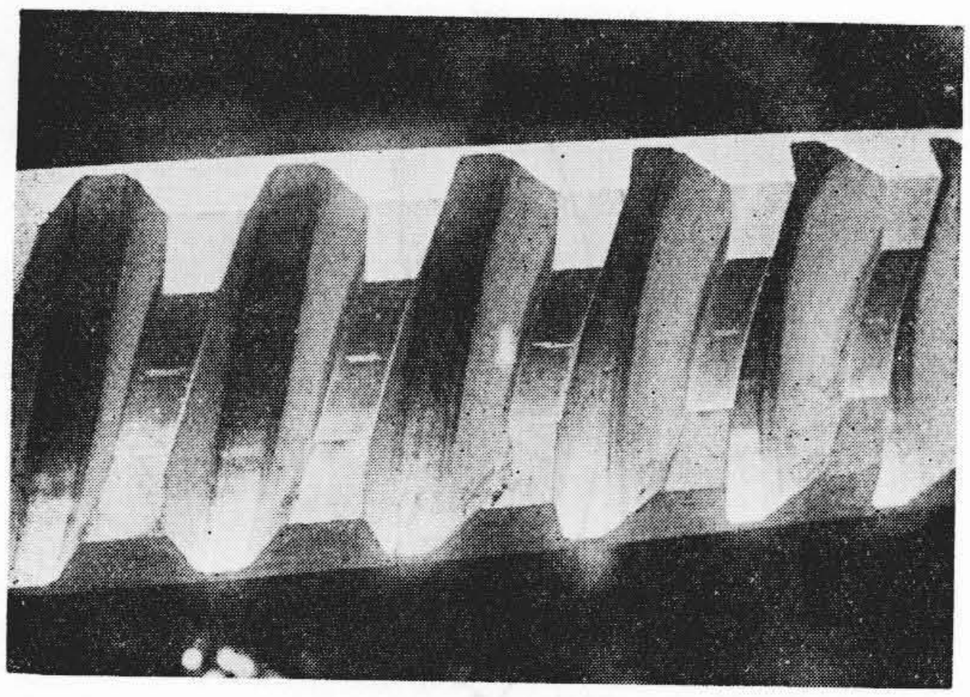
第 12 図　直線歯形の無修正カッタによるウオームの歯当り

Fig. 12.　Tooth Bearing of the Worm Cut by the Conventional Cutter



第 13 図　修正カッタによるウオームの歯当り

Fig. 13.　Tooth Bearing of Worm Cut by the Corrected Cutter



第14図 負荷運転下の歯当り
Fig. 14. Tooth Bearing of the Worm Wheel under Operating Load

び、有効面積の 80% 以上の歯当りとなつた。従来は相当長期間の負荷運転後歯がなじみ、始めてこの程度の歯当りを得ることができたものである。

（B） 音響並びに振動試験

動力伝達用ウォーム歯車における、精密工作の最終目的である歯車装置の音響、振動の減少に対する、本研究の効果を確かめるために、次の実験を行つた。即ち直線歯形の無修正カッタにより仕上げたウォームと、普通型ホブ仕上げのウォームホイールとで組立てたウォーム歯車の音響振動を調べた。次に本研究による修正カッタで仕上げたウォームと、セレーテッドホブにより仕上げたウォームホイールとを組合せたものを試験し、両者を比較した。尚実験は総て正規負荷下において行つた。

a） 音　響

ウォームホイールカバーの、のぞき孔よりマイクロフオンを入れ、ギヤケース内の音響を騒音計によつて測定した。その結果を**第3表**に示す。これで明らかな如く、音響は従来に比して約 17% の低下となつた。新ウォーム歯車の場合、歯自体の噛合音はごく僅かで、むしろ潤滑油の掻廻される音が大きい。

b） 振　動

振動の測定個所には、最も振動の大きいウォームホイールカバーの上面を選んだ。その結果を**第4表**に示す。これで明らかな如く、振動の低下は相当大きい。無負荷時における新歯車の場合は、手を触れてもよく注意しないと振動を感知できない程である。

[VI] 結　　言

以上ウォームの歯形解析を行い、所要歯形を得るためのカッタの設計、製作、ウォームの工作、並びにウォーム歯車として組合せた場合の性能について述べ音響、振動を著しく減少することができたことを報告した。単条ウォームの場合は問題にならぬが、多条ウォームの如き進み角の大きいウォームを精密に工作する場合には、それを仕上げる工具輪廓の修正を行わねば良好な歯当りを得ることはできない。カッタの修正はそれ程困難な問題でなく、工作も比較的容易である。このウォームをセレーテッドホブで精密に仕上げたウォームホイールに組合せた場合には、機械加工のままで完全な歯当りを得ることができ、歯車装置の音響、振動を大幅に減少させ得る。従つて歯当りを出すためのスクレーピングは全然不用となる。尚本研究を高級エレベータ用ウォーム歯車装置の製作に応用し非常な好結果が得られた。既に某大ビルを始め各処にこの方式によるエレベータを納入し好評を得ている。

最後に本研究に当り種々御指導を頂いた九州大学和栗博士、日立中央研究所明山博士に厚く御礼申し上げる次第である。

第3表 歯車の音響比較
Table 3. Comparison of Gear-noise

ウォーム回転数 r.p.m ＼ 回転方向 / ウォーム歯車種別	正回転		逆回転	
	800	1,000	800	1,000
旧ウォーム歯車	1.00	1.04	0.99	1.03
新ウォーム歯車	0.83	0.87	0.82	0.86
音響低下率(%)	17.0	16.3	17.2	16.5

註：数値は旧ウォーム歯車のウォーム正回転 800 r.p.m. の場合の値を1.00とした比較値を示す。

第4表 歯車振動の振幅の比較
Table 4. Comparison of Amplitude of Gear-vibration

振動測定方向 ＼ 回転方向 / ウォーム歯車種別	正回転		逆回転	
	横	縦	横	縦
旧ウォーム歯車	1.00	0.78	1.55	1.44
新ウォーム歯車	0.75	0.56	1.22	0.56
振動低下率(%)	25	28	21	61

註　数値は旧ウォーム歯車のウォーム正回転、横方向の場合の値を 1.00 とした比較値を示す
ウォーム回転数 800 r.p.m.

参考文献

（1） 景浦、久米、兼松：日立評論 34. 801.（昭27-6）
（2） 福井 ：エンヂニヤリング 37. 244.（昭26-12）
（3） 奥島 ：機械学会論文集 3. 268（昭12-8）