ダビット・ブラウン社製増速ウォーム・ギヤの解析*

富 田 稔**

Analysis of Speed-up Worm Gears made by David Brown & Son's Co.

by Minoru TOMITA

In order to drive a worm by a worm wheel, we must use a multithreaded worm with large lead angle. But such worm gears are very difficult to be made. Since David Brown and Son's Co. in England has been successfully making these gears, I examined a pair of worm and worm wheel made by the Company. As a result I have found the following essential points:

- The lead angle of the worm is about 45° , that seems to be taken to work at the maximum efficiency.
- A special care has also been taken to lead in lubricating oil to the point of mesh of tooth surfaces even under heavy load.
- Top relief and root relief have been given on the worm tooth.
- Crowning of about 0.025 mm has been given on the worm thread, too.
- The worm wheel has been made of phosphor bronze and the worm of hardened steel ($H_s=74$), its surface being ground to mirror finish.

緒 言

ウォーム・ギヤの伝導効率を上げるには、ウォームの進み角を大きくせねばならない。増速ウォーム・ギヤでは、ウォーム歯車からウォームを回すのであるから、進み角は少くとも、静止の摩擦角を越さねばならない。進み角が大きくなると製作が非常にむずかしく

第 1 図

なる。第 1 図に示すものはイギリス David Brown & Sons 社の進み角の非常に大きい増速ウォーム・ギヤである。これは第 2 図に示すミルウォーキー型フライ

ス盤の主軸駆動用のもので、同フライス盤を試作した日支事変当時わが国においてはその製作に非常に苦しし、遂にダビット・ブラウン社に、そのウォーム・ギヤを作ってもらって使用し、初めて好結果を得たそう

第 2 図

である。幸いその増速ウォーム・ギヤを得たので、何か特別な秘密があるのではないか。特別な加工、精度、くふうがなされているのではないかと考え、その解析を試みた。

ウォームは左 10 口、ウォーム歯車は歯数 24 枚、中心距離は $4.720''$ (119.888 mm) と指定されていた。

1. ウォーム歯形の測定

イギリスダビット・ブラウン社製なのでインボリュートウォームであろうと考えた。インボリュートウォームはインボリュートねじ面を持つウォームで、軸直角断面の歯形はインボリュートをなす。そこでウォームの端面を正しく研削仕上げして軸直角断面の歯形を現わさしめ、第 3 図に示すようにツェイスの万能測定

* 昭和 29 年 4 月 7 日 第 31 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 31 年 1 月 5 日。

** 正員、山口県立下関安岡工業高等学校。

顕微鏡に回転テーブルを取りつけ九州大学和栗教授の発表された方法⁽¹⁾によって測定した。まず顕微鏡で歯たけのはぼ中央、半径 R の所の圧力角 $\alpha=30^\circ 54'$ を

第 3 図

読み、その点 M を通り圧力角 α を構える正しいインボリュート歯形を描く。そしてそれに対する実際の歯形の狂いを示したものが第 4 図である。

縦軸は正しいインボリュート歯形、横軸はその歯形に直角に測った実際の歯形の出入りを示す。実際の歯形は歯先、歯元ともにわずかに逃げてはいるが、基本歯形は縦軸で示されるインボリュート歯形であって、基礎円

第 4 図

筒半径 $R_b = R \cos \alpha = 34.765 \text{ mm}$ のインボリュートウォームであることがわかった。また歯先歯元の逃げはウォームの軸直角断面の歯形に 0.04 mm 程度のふくらみをつけたことになる。

2. ウォームのピッチ測定

次にピッチの測定も、やはり万能測定顕微鏡で行った。インボリュートウォームであるので第 5 図のごとくナイフエッジを基礎円半径だけ高くしてねじ面にあて、インボリュートねじ面の創成母線の方をとりさせる。そして顕微鏡の中心に、歯形上の一点 P_0 を合わせ、 P_0 点の横方向の位置を基準尺で読む。次にナイフエッジを隣のねじ面にあて、テーブルを横方向に移動し顕微鏡の中心に P_1 点を合わせ、その位置を基準

第 5 図

3. 主要寸法

軸方向ピッチ t_a より

ウォーム歯車のピッチ径	$D = Z t_a / \pi = 167.07 \text{ mm}$
ウォームのピッチ径	$d = 2C - D = 72.71 \text{ mm}$
モジュール	$m = t_a / \pi = 6.961 \text{ mm}$
リード	$L = 10 t_a = 218.68 \text{ mm}$
ウォームの外径、歯底径	$j = 94.94 \text{ mm}, i = 69.2 \text{ mm}$
ウォーム歯末のたけ	$a = 1/2(j - d) = 11.11 \text{ mm}$
ウォーム歯元のたけ	$b = 1/2(d - i) = 1.75 \text{ mm}$

第 6 図

めているが $q = d/m = 10.44$ となり整数とならない。またウォームの歯元のたけはきわめて短くピッチ点はウォーム歯車から外れているので、オール・アッデンドラム・ウォームである。

進み角 γ はピッチ円筒上で $43^\circ 45'$ 、基礎円筒上で $45^\circ 2'$ となっている。理論上最大効率を与える進み角は、ウォーム駆動のとき $\gamma = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho'}{2}$ 、ただし $\tan \rho' \cong \mu / \cos \alpha$ 、今 $\mu = 0.03$ とすれば $\gamma \cong 44^\circ$ となるのであるいは最大効率をねらっての進み角ではないかと考えられる。ウォーム歯車で駆動するときは $\gamma = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho'}{2}$ のとき最大効率となる。今の場合 $\gamma \cong 46^\circ$ となる。

4. ふくらみ

ウォームのねじ筋を調べたところ、ねじ筋に沿ってもふくらみのついていることがわかった。軸方向ピッチを万能測定顕微鏡で測定したときと同様に、ナイフエッジを基礎円半径だけ高くしてねじ面の創成母線に当て、顕微鏡の中心に P_0 点を一致させる (第 7 図参照)。そして P_0 点の横方向位置を基準尺で読んで

尺で読む。 P_0 、 P_1 の読みの差すなわちテーブルの移動量が軸方向ピッチ t_a となる。その際進み角が大きいので光源は上から当てた。測定の結果軸方向ピッチは $t_a = 21.868 \text{ mm}$ であった。

基準点とする。次にウォームを正しく θ 回転し、再びナイフエッジをねじ面に当てる。テーブルを横方向に移動し顕微鏡の中心に P_1' 点を合わせ、その横方向位置を基準尺で読む。この二つから実際のねじ筋の進み l' を求め、それと理論上のねじ筋の進み l との差 Δl によって、ねじ筋の軸方向出入量を知る。 Δl に理論上の進み角の余弦を掛けるとねじ筋に直角な出入量が求められる。

第 7 図の曲線はその結果で、ウォームの両端約 10 mm ずつを除いたウォーム軸方向の長さ 42.5 mm に対して 0.025 mm 程度のふくらみがついていた。反対歯面も同程度であった。ギャツース・バーニヤでねじ筋の中央部と左右の歯厚を測ったが中央部は果して 0.04~0.05 mm 厚い。

第 7 図

5. ウォームねじ筋のピッチ精度

また基準点 P_0 から 1/口数、すなわち 36° 正しく回転して、隣のねじ面の位置を横方向基準尺で読み、基準点 P_0 の読みと比較することにより、隣のねじ面の軸方向出入量、すなわち誤差を知ることができる。この誤差を円周方向に換算することにより、円周方向ピッチ誤差すなわちねじ筋のピッチ誤差が得られる。

第 8 図はその結果で端面より 20 mm ほど入った実際かみあいの行われている所での集積ピッチ誤差曲線である。最大集積ピッチ誤差約 3 分 40 秒である

第 8 図

第 9 図

が、端面では約 5 分であった。

6. ウォーム歯車のピッチ精度

一方ウォーム歯車のピッチはツァイスの照準分度測

定器とオルソテストを使用して行った。第 9 図に示すように最大集積ピッチ誤差 3 分 12 秒、最大単一ピッチ誤差 57 秒である。かようにピッチの精度は余り高くない。

7. 回転精度

同じく照準分度測定器を使用し、ウォームを 1/6 回転ごととあて回して、それに対するウォーム歯車の遅速を調べた。第 10 図上はその結果である。ウォーム歯車 1 回転につきウォーム 24/10 回転、すなわち 2 回転と $2.4/6$ 回転する。ウォーム歯車 1 回転につき約 4 分の遅速の波を描いているが、その間ウォーム 1 回転ごとにそのピッチ誤差が現われているようである。

またウォーム歯車の歯面に薄板をはりウォーム歯車 1 歯ごとの遅速を調べた。ウォーム歯車 1 ピッチの回転はウォームの 1/10 回転すなわち 36° となる。ゆえに第 10 図上をいっそう小さく分け、ウォームの 1/6 $\times$ 1/10 回転すなわちウォームを 6° あて回してそれに対するウォーム歯車の回転の遅速を調べた。第 10 図下の実線は歯面に薄板をはらない場合である。今ウォームの ① 番の歯面とかみあうウォーム歯車の歯面に薄板をはると 1 点鎖線で示される遅速の波を描く。薄板をその前あるいは後のウォームの ⑩ 番、② 番とかみあうウォーム歯車の歯面に入れると点線のような波

(上) ウォーム 1/6 回転ごとに対するウォーム歯車の遅速

(下) ウォーム 1/60 回転ごとに対するウォーム歯車の遅速

第 10 図

を描く。これからみると、ウォームとウォーム歯車の 1 歯のかみあい期間はウォームの回転角 66° 程度でかみあい率は約 1.8 であるが、実際にはウォームの歯たけや歯筋に沿ってのふくらみの結果、かみあい期間は 36° 、すなわち 1 ピッチしか働いていないことがわかる。

8. 当 り

ウォーム・ギヤは組立関係位置によって当りに非常な影響を受ける。刻印に指定された中心距離を基準にとってそれから関係位置をいろいろと変えて当りをみた。もちろん基準位置は正しくとらねばならぬ。まずウォーム軸とウォーム歯車軸とを正しく直交させ、中心距離はブロック・ゲージを使用して正しくとった。また、ウォーム軸とウォーム歯車中央面との一致はブロック・ゲージを使用してとったが、これはウォーム歯車の歯の左歯面、右歯面の当りの等しい位置がちょうどそれであった。

第 11 図

第 11 図 A は中心距離を変化した場合の当りの状態を示す。0 は指定された中心距離の場合、縮めると当りは増し開くと当りは減ずる。矢印はウォーム駆動の場合のウォームのすべり込み方向である。この場合は潤滑油の引入れに都合がよい。しかし当りとしては片当りに近く低過ぎるのではなかろうか。また増速の場合にはウォームのすべり込みが反対となるので油の引込みにこのままでは困るのではないかと懸念される。

そこでウォームをウォーム歯車の軸方向に移動してみた。すなわち、ウォームを下げると B に示すように当りはますます狭くなり、上げると C のように当りは増加する。ウォームを 0.65mm 上に上げると全面に当たって良いと思われるが、それからお上がると、当りは両端 2 個所に分れて悪くなる。ところで、これらの当りはすべて荷重のない場合で、荷重をかけた場合には減速でも増速でもウォーム歯車は下がりウォームは歯車に対して上がり勝手になる。ただしウォーム左巻きの今の場合である。それゆえ先ほどの正しい組立位置で当りの少いことは荷重をかけた場合のウォームの上がり勝手による当りの増加を見込んだものと考えられる。

またどの当りにも直線状の境がある。これは歯先に逃げを与えたものである。しかしこの逃げは下部のみに与えてあってしかも特に大きくしてあることには深

第 12 図

い意味があるのではなかろうか。すなわち増速のときのウォームすべり込み側なので、油の引込みを考えて特につけたエントリ・ギャップと思われる。

一方反対歯面の当りは、中心距離を変化した場合には第 11 図 A と同一である。ただ当り個所が上部についている。すなわち反対歯面は 180° 右に返した図となり、当りは上に 180° 回転した図になる。ウォームを下げ、あるいは上げたときの反対歯面の当りは B, C の逆になっている。すなわち今、0.6mm ウォームを下げると、反対歯面の当りは C 図 0.6 上で示される当りと同様な当りであるが、当り個所はやはり上部にくる。前と同様に荷重が掛って当りは良好になる。

9. す き ま

ウォームとウォーム歯車のかみあい状態におけるすきまを九大和栗教授の発表された方法⁽²⁾で測った。ウォームを固定し接触している歯面の間に銀ろう板をはさむと、それだけウォーム歯車は回される。それをダイヤル・ゲージで読み、今度は測定せんとする所にだけはさむと、そこにあったすきまだけウォーム歯車の回され方が少くなる。それからすきま量を知り

うる。もちろんダイヤル・ゲージの読みはピッチ円上に換算しなければならない。第 13 図はその結果である。A は刻印で指定された中心距離の場合のすきま曲線、0.3mm 縮んだ場合が B、0.3mm 開いた場合が C である。いずれも両端のすきまは相当大きくふくらみが十分つ

第 13 図

いていることがわかる。下図はウォームを上下した場合のすきま曲線を示す。

10. 同時接触線

また同時接触線を次のようにして実験的に求めた。まずウォーム歯車の歯面に光明丹をつけ、測定せんとするそのかみあい位置でウォームと強く接触させる。そしてウォーム歯車を回すとウォームは *a* 図矢の方向にすべり、そのかみあいの接触位置を境にして「黒当り」がつく。また同一かみあい位置で今度はウォームを *b* 図矢の方向に回すとその接触位置から下に「黒当り」がつく。この二つの方法を同一かみあい位置で行い境界線の位置を測定することによって、そのかみあい位置における同時接触線を知りうる。

第 14 図

第 15 図

第 15 図は中心距離を 0.3mm 縮めた場合のすきま曲線、同時接触線、およびウォーム歯車中央面でのかみあい状態図である。今ピッチ点がウォームの歯厚の中央にあるときを基準として、ウォームが θ 回転するとウォームの進み l と、ウォーム歯車の回される角度 β は次式で示される。

$$l = L \times \theta / 360^\circ, \quad \beta = Z_w / Z \times \theta$$

ウォームを 10° 回転した場合のすきま曲線は、上図

右の 1 点鎖線のようにになる。まだ接触が行われていない。ウォームが 20° 回転したときのすきま曲線は実線で示され、そのときの同時接触線は、左図の実線である。点線内が当りであるからかみあい直後ということがわかる。矢印はウォーム駆動のときのウォームすべり込み方向である。次々に 10° ずつウォームを回転したときのすきま曲線および同時接触線は下部に移動している。しかしこれは減速の場合で、増速の場合には反対となる。すると歯先の逃げが、増速の際のエントリ・ギャップとして油の引込みに有効に働いていることがわかる。増速用として特に設けられたエントリ・ギャップと考えてよい。

11. か た さ

ウォームは はだ焼鋼 で、鏡の面のようにりっぱに研削仕上げされていた。歯の頂のかたさは平均 $R_a = 53$ (シヨア, 74) 焼入硬化の及んでいないと思われる端面研削跡の部分では $R_a = 18$ (シヨア, 35) である。ウォーム歯車はりん青銅で $R_B = 59$ (シヨア, 18) であった。

12. 結 言

ピッチの精度は予想したほど高精度ではない。しかし、いろいろなくふうがなされている。まず第 1 にふくらみがつけてある。ねじ筋や歯たけにふくらみをつけ、角が当らぬようそしてできるだけなめらかな伝達をはかり、取付関係位置の影響を少くしようとしている。第 2 に当りは、使用状態を考えての当りとしている。たとえ無負荷のとき片当りでわずかであってもよい。荷重をかけた場合のウォーム歯車の関係位置の当りの変化等を考慮することがたいせつである。第 3 に必ずエントリ・ギャップをつけねばならぬ。わざわざ歯先の一部の切り逃げを行っている。めんどうなことではあるが増速のためのエントリ・ギャップとして潤滑に非常に有効である。そしてウォームの面はかたく研削仕上げ鏡の面のようになめらかで、ウォーム歯車とのなじみに手数をかけている。

本研究は昭和 27 年度文部省産業教育振興法に基く九州大学留学中に行ったものである。終始御懇切な御指導を賜った九州大学和栗明教授を始めとし、同工作実験室の方々に深甚の謝意を表すとともに、ウォーム・ギヤを提供して下された池貝鉄工所に厚く御礼を申上げる次第である。

文 献

- (1) 和栗・相浦, 九州大学工学集報, 28 巻 3 号。
- (2) 和栗・相浦, 機械学会論文集, 18 巻 70 号, IV-19 ページ。