

プラスチック・インボリュートはすば歯車ホイール 鼓形ウォームギヤの開発

牧 充*

小林 一郎**

堀内昭世***

魯 子和****

Development of Hourglass Worm Gear of Plastics Involutes

Helical gear Wheel Teeth

by

Minoru MAKI

Ichiro KOBAYASHI

Akiyo HORIUCHI

Zihe LU

Abstract:

The authors developed the new type hourglass worm gear of plastics involutes helical gear wheel. The theory, the calculation of the tooth contacts analysis for the prediction of the performance of the gear and the production method of the steel worm and the plastics wheel are reported. A set of the hourglass worm gears was manufactured. And the accuracy of the transmission was measured by the measuring machine for the angular transmission error of the reducer invented by A. Horiuchi and others.

The efficiency was tested by the power absorption type worm gear testing machine, designed and made by the authors. The efficiency of the hourglass worm gear was compared with the cylindrical worm gear of steel worm and plastics involutes helical gear wheel whose dimensions was the same of the hourglass worm gear proposed in this report.

Key words: hourglass worm gear, plastics involutes helical gear wheel, tooth contact analysis, experiment of efficiency, manufacturing of hourglass worm and wheel

1. はじめに

著者らはプラスチック・インボリュートはすば歯車をホイールとする鼓形ウォームギヤを開発した。本研究は牧らが開発し、世界中でその性能の高さが認めら

れている鼓形ウォームギヤ⁽¹⁾、⁽²⁾を乗用車用、医療用器具、ロボット用あるいはマイクロマシンなどに用いようとするものである。最近特にこのような機械部品には環境に対する負荷を軽減すること、及び銅合金などの価格が高騰していることに対処することが求められている。そこで

本研究は、従来銅合金を用いていたホイールをプラスチック製とすることにより、高効率、高付加能力を持った重らいより小型鼓形ウォームギヤの開発を目的としている。

本研究はまずハセックギヤ(株)からの工学総合研究所委託研究として鋼ウォームと銅合金ホイールとで構成し軸間距離 100 mm ものを医療機用伝動装置として実用化した。日本機学会への報告により、アイシン精機(株)から工学総合研究所委託研究として軸間距離 50 mm 程度で鋼ウォームとプラスチック・ホイールの自動車社用伝動装置としての共同開発の委託があった。以上のような経緯を経て現在も本研究を継続して進めてきた。この研究の経過および現在までの結果をここに報告する。

2. 基本理論

古典的ヒンドレーの鼓形ウォームギヤではまず直線を刃物歯車として、ウォーム歯面を創成する。この直線と相手ウォームとはかみあい歯数の大きい定回転比軸直角伝動装置を構成する。この歯車は17世紀の時計師ヒンドレーの発明とされ、ヒンドレーの鼓形ウォームギヤと呼ばれてきた。しかし図1に示すように、この歯車は最近発見されたレオナルド・ダ・ビンチの手稿に克明に描かれている。⁽³⁾ 彼はこのウォームギヤを図2のように、巨大な石弓の弦の巻き上げ用ウインチに使用するアイデアの見事な絵を描いている⁽³⁾。

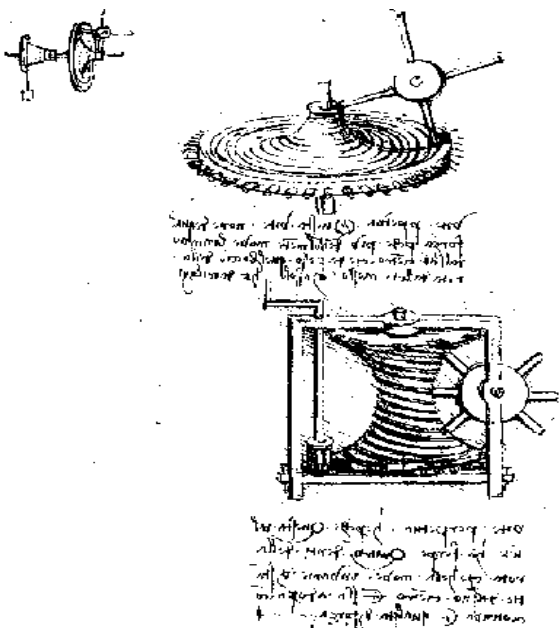


Fig.1 Leonardo's Sketch of Hindley Hourglass

このウォーム歯面を刃物歯車としてホイール歯面を創成するとき、ホイール歯面には包絡面と呼ばれる相対曲率半径の大きいかみあいをする歯面が表れる。ホイール歯面中央部には稜線と呼ばれる直線が現れるがこの直線に近づくにしたがって、ウォーム歯面とこの包絡面との接触は相対曲率半径がに近づく事を牧は理論的に明らかにした。⁽⁴⁾ 図3にこの

歯車歯面の接触線および歯面間の接触状況を示す。接触線は歯筋にほぼ直角に現れ、潤滑油の流れに接触線がほぼ直角になることが予測できる。

実用に際しては、かみあい始め部 および終わり部の不都合な端当たりたりなどを避けるための修整法が採用されてきた。工具の設定をかみあい始めと終わり部を歯切りの際にウォームの歯面の両端部を逃がす三段階歯切り法やウォーム歯面の歯切り回転比をウォーム・ホイールのそれより大きく変え

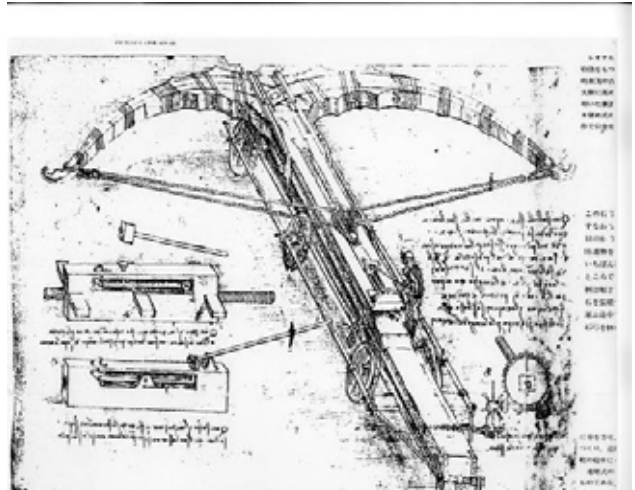


Fig.2 Leonardo's Sketch of huge Stone Bow

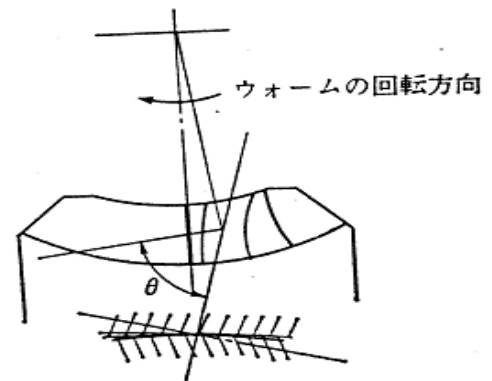


Fig.3 Contact mechanism of mating teeth of Hindley Hourglass Worm gear

て歯切りする豊山の転異方式連続修整歯切り法⁽⁵⁾などがある。

石川はウォームの歯面が磨耗した後歯当たり状況がよくなるのでその磨耗後の形状に連続修整歯切りを行って歯切りする方法を連続修整歯切法⁽⁶⁾と呼んで実用化した。図4にその方法を示す。

即ち、歯切り基礎円半径をウォーム歯面のそれよりやや大きくし、加工減速比を実際のかみあい減速比よりやや大きく取って、ウォーム基礎円半径より歯切基礎円半径をやや大きくして、歯面両端に

クラウニングを連続的に与える。図4において、 a はウォームとホイールの軸間距離、 l は直線切れ刃、 r_z はかみあい基礎円半径、 r_z は歯切り基礎円半径である。 a は歯切り軸間距離の増分である。 d_2 をかみあいピッチ円とする。図4において、かみあい始め部を歯切りする際切れ刃 l は切り込み e だけウォーム内部に切り込んでいる。一方、かみあい終了部では切り込み f だけウォーム実質部に切り込んでいる。このようにこの連続修整法では一度の歯切りで、かみあい始め部および終了部を連続的に切り込む歯形になる。その結果、古典的ヒンドレーウォームギヤの良好なかみあいを行うホイール八歯面の包絡面がなだらかな曲面に修整され、その結果のど部で包絡面が無くなり、ウォーム歯面と直線とのかみあいになるという現象が改善され、ウォームの歯幅全域に良好なかみあい範囲が広がる。牧と日本ギヤは共同で石川の修整ヒンドレー鼓形ウォームギヤの直線を円錐砥石に変える鼓形ウォームギヤを開発した⁽⁷⁾。円錐砥石で連続修整ヒンドレーウォーム歯面を研削した後、そのウォーム歯面形状を切れ刃面とするホブでホイールを歯切りする。このホブはワイヤカット放電加工法で工具鋼切れ刃を加工した、組み立てホブを製作し、ホイールを歯切した。

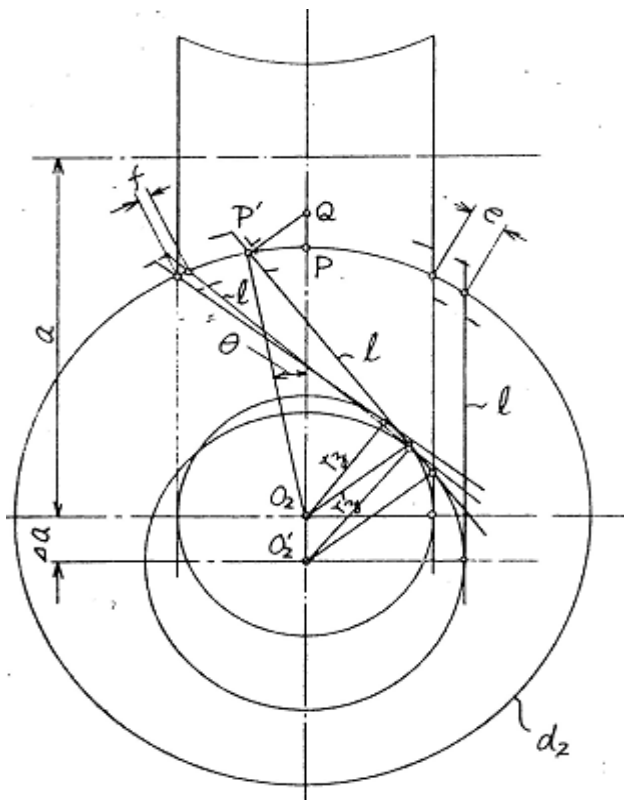


Fig.4 Modifying Hindley Worm cutting Method by Ishikawa

このウォームギヤのかみあい状況およびウォーム歯面上の歯当たりマークを図5に示す。歯当たりマークはウォーム歯面歯幅の全域に広がっている。

本研究はこれまで説明してきた石川の連続修整ヒンドレーウォームギヤ歯切法において直線切れ刃として、インポリュートはすば歯車を用いようとするものである。すなわち、図5に示した連続修整ヒンドレーウォーム研削加工法において、ウォームの



Fig.5 Modifying Hindley Worm Gear ground by cone shaped grinder

歯面を研削している円錐砥石をインポリュートはすば歯車に変えて構成する。この鼓形ウォームギヤは牧とハセックギヤ(株)とでウォーム材を鋼、ホイール材を銅合金として、軸間距離100mmのものを医療用機器として実用化した⁽⁸⁾。本研究ではホイール材をMC6ナイロンとして軸間距離50mm以下の小型用として提案する。

3. ウォーム・ホイールの加工方法

図6に本研究提案のウォーム歯面粗削りの状況を示す。まず粗削りでは直線刃を持つピニオンカッタで連続修整ヒンドレーウォームを加工する。最終仕上げは図7のように鋼製インポリュートはすば歯車にダイヤモンド砥粒を電着した総形砥石で創成研削を行った。すなわち工具歯車および被加工ウォーム

のかみあい運動をホブ盤で行わせて研削仕上げを行った。ヒンドレーウォーム歯面と連続修整ウォーム歯面との中央断面のピッチ点近傍での偏移すなわち研削しろは軸間距離 50 mm, 減速比 40 の諸元で $80\ \mu\text{m}$ 程度である。図 7 にダイヤモンド電着インポリュートはすば歯車総形砥石で仕上げウォーム歯面の仕上げ加工を行っている状況を撮影した写真を示す。



Fig. 6 Cutting of Modifying Hindley Worm by Pinion Cutter with straight lined tool



Fig.7 Grinding of Modifying Hindley Worm by the Involute helical gear grinder, on which the diamond abrasive grains are attached

4. 歯当たり解析

歯当たり解析は、軸角や軸間距離等の歯車の組み立て誤差や加工誤差の影響で、歯当たりがどのように変化するかを解析的に求めようとするものである。

アメリカのグリーンソン社が自動車の差動歯車装置におけるハイポイドギヤの工具設計等の目的で開発し、世界中の自動車メーカは、このソフトを購入し、ソフトの内容は公開されないまま利用してきた。日本では、牧が初めてこの歯当たりソフトをウォームギヤ用に開発し 1981 年の東京で開催伝動装置国際会議で報告した⁽⁸⁾。

4.1 3D・CAD による歯当たり解析

図 8 はインポリュートはすば歯車歯面の数学的モデル・インポリュートヘリコイドの模型である。

インポリュートヘリコイドは円筒に巻きついた定リードのらせんの接線群で構成される。微分幾何学の定理では、一般に空間曲線の接線群で構成される曲面は平面の上に展開できる。このような曲面を可展面という。最もわかりやすい可展面は円錐面である。円錐面は図 9 のように、扇形の紙片を丸めて作ることができる。同様にインポリュートヘリコイドも一枚の紙から作ることができる。図 8 のモデルにおいて近接 3 本の接線は近似的に円錐面と看做することができる。



Fig.8 Model of Involute Helicoids

インポリュートヘリコイドはこれを数式で表現するには 図 9 のように円筒に巻きつけた直角 3 角形 of 用紙をほぐしていくときの斜辺の空間に描く軌跡と捉えるとわかりやすい。このとき軸直角断面は円に巻き付けた糸をほぐしていくとき、糸の先端が描く軌跡である。これは中学生などが学ぶインポリュート曲線である。軸直角断面がインポリュート曲線であるねじ面をインポリュートヘリコイドと言う。

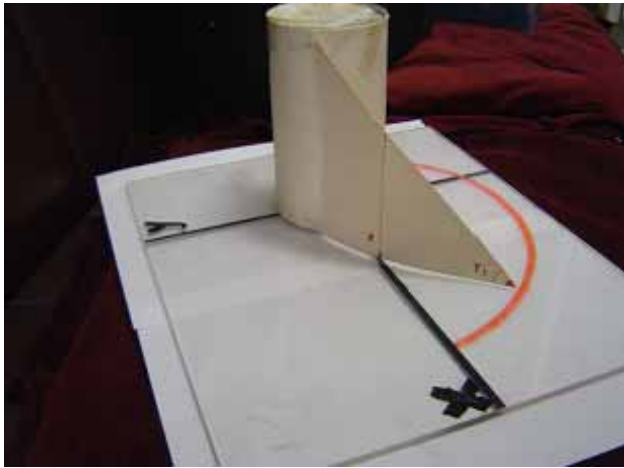


Fig.9 Model of Involute Helicoids for Explanation by equations

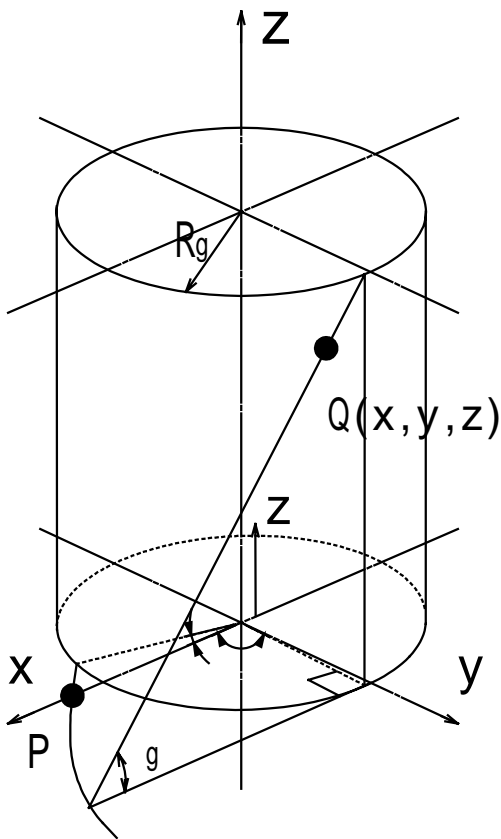


Fig.10 Model of Involute Helicoids for Explanation by equations

$$\begin{cases} x = R \cos \alpha (\cos \varphi + \varphi \sin \varphi) - \cot \gamma_g z \sin \varphi \\ y = R \cos \alpha (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) + \cot \gamma_g z \cos \varphi \\ z = zk \end{cases}$$

⋯⋯(4.1)

図10はこの曲面を数式で表現する説明図である。円筒に巻きつけた直角3角形を用紙をほぐしていくときの斜辺上の一点を円筒に固着した直角座標系で表現して式(4.1)を得る。この円筒を基礎円筒、直角3角形の斜辺の底辺に成す角を円筒上進み角という。この2つの量を決定すればインボリュートヘイリコイド即ち、インボリュートはすば歯車を決定できる。

$$r = k\theta, \quad k = \frac{P}{2\pi \tan \alpha} \quad \dots (4.2)$$

円筒ウォームの基礎曲面はアルキメデスのねじ面である。旋盤を用いて直線切れ刃で加工される。軸直角断面の形状は極座標での最も単純な形状である。

式(4.2)であらわせる。ここに加工との諸元と係数 k との関係の P はねじのピッチ、 α は圧力角である。この角度は旋盤に設定する切れ刃の角度である。

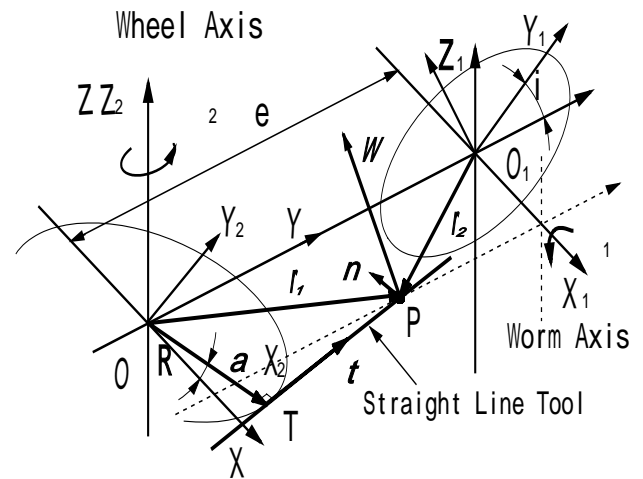


Fig.11 Coordinates emplane the relations of cutting Hindley worm tooth

今、図11において、ウォーム軸を X_1 軸としてウォームに固着して回転する座標系を $O_1 - X_1 Y_1 Z_1$ とする。同様に、工具軸（ホイールの軸と共通）を Z_2 軸としてホイールに固着して回転する座標系を $O - X_2 Y_2 Z_2$ とする。工具の回転角を φ とすれば、加工物であるウォームの回転角は $i\varphi$ になる。

ここにウォームと工具（ホイール）の回転角速度を ω_1 と ω_2 とするとき、 $i = \omega_1 / \omega_2$ である。またウォーム軸と工具軸の軸間距離を e とする。各座標系間の関係を列ベクトル X, X_1, X_2 及び座標変換行列 A_1, A_2 を用いて次のようにあらわす。

$$X = A_1 X_1 + C_1 \quad \dots (4.2)$$

$$X = A_2 X_2 \quad \dots \dots (4.3)$$

ウォームを加工する工具直線を $0 \quad X_2 Y_2 Z_2$ 座標系により表せば、 a をパラメータとして、

$$X_2 = B + \lambda M \left. \begin{array}{l} B = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right\} \dots \dots (4.4)$$

ここに a は工具軸と工具直線の距離である。この直線を静止座標系により表せば、

$$X = A_2 (B + \lambda M) \quad \dots \dots (4.5)$$

そこでこの直線をウォームと共に回転する座標系 $0_1 \quad X_1 Y_1 Z_1$ により表せば、

$$X_1 = A^{-1} A_2 (B + \lambda M) - A^{-1} C \quad \dots \dots (4.6)$$

ここに、各々の列ベクトル及び行列はつぎのような内容を持っている。

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad X_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad X_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad \dots \dots (4.7)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} A_2 = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ C_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ e \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right\} \dots \dots (4.8)$$

式(4.6)により工具直線の軌跡を $0_1 \quad X_1 Y_1 Z_1$ 座標系により求めることができる。この式は、 (λ, ϕ) をパラメータとするウォーム歯面の式でもある。

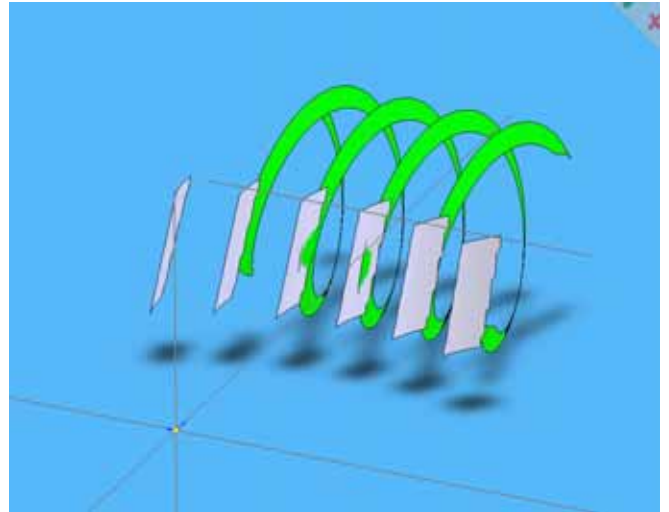


Fig.12 Tooth Contact Analysis of Archimedian Screw Worm and Involutes Helical Wheel by 3D/CAD

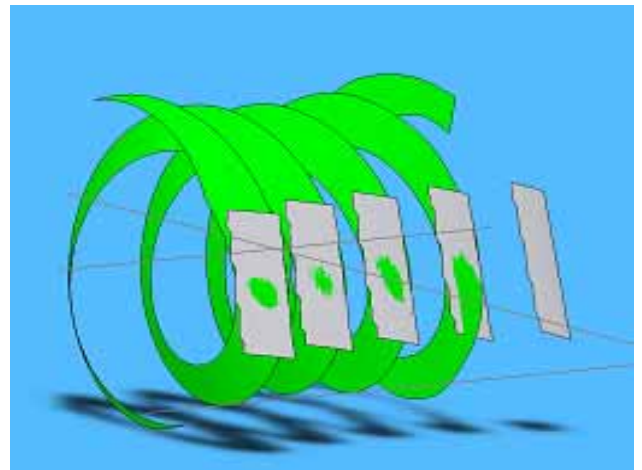


Fig.13 Tooth Contact Analysis of Modified Hindley Worm and Involutes Helical Wheel by 3D/CAD

以上の諸式によりアルキメデスのねじ面をウォームとし、インボリュートはすば歯車をホイールとする円筒ウォームギヤの歯当たりの状況を 3D/CAD により描くことができる。図 12 にその結果を示す。またヒンドレーの鼓形ウォームとインボリュートはすば歯車をホイールとする鼓形ウォームギヤの歯当たり解析の図を描くことができる。図 13 にその結果の図を示す。直線で加工したヒンドレー鼓形ウォームとインボリュートはすば歯車で包絡した鼓形ウォームのウォーム軸を含む断面形状のピッチ点近傍の偏移は第 2 章で述べたように軸間距離 50 mm、減速比 40 の諸元で 80 μm 程度である。直線で加工したアルキメデスねじ面ウォームを円錐砥石で研削する場合の研削代も同程度である。したがって図 12, 13 で示すような直線工具での粗削りの

段階での円筒ウォームギヤと鼓形ウォームギヤの歯当たり解析により、円錐砥石で研削後の円筒ウォームギヤとはずば歯車形砥石で研削後の鼓形ウォームギヤの3D/CADでの歯当たり解析を見て運転性能予測できる。0.1mm以下の誤差は目視になら影響を与えない。この観点から図11と図12の3D/CADによる歯当たり解析結果から次のことが言える。図12の円筒ウォームギヤでは同時かみあい歯数は2である。また同時接触線は歯筋に平行に現れる。一方、図13鼓形のウォームギヤの同時かみあい歯数は4である。また接触線の歯当たりマークは大きく、歯筋に直角方向に現れる。以上より鼓形ウォームギヤの一歯にかかる負荷は円筒ウォームギヤの負荷の1/2程度であることが予測できる。

歯面間のすべり方向即ち相対速度方向は、ほぼ歯筋方向と考えられるので潤滑性能は鼓形ウォームギヤの方が優れていると考えられる。一歯にかかる負荷が小さいほうが歯面間の油膜形成に有利である。以上より図12,13の3D/CADによる歯当たり解析結果より本研究で提案するインボリュートはずば歯車をホイールとする鼓形ウォームギヤが従来の円筒ウォームギヤより効率および負荷能力において優れていることを予測できる。

4.2 数値解析による歯当たり解析

図14に牧の歯当たり解析のアルゴリズム⁽⁸⁾を説明する。Z方向のある任意の位置歯車の軸直角平面で両歯車歯面を切断し、この平面と両歯面の断面歯形をa-a, b-b, Z軸との交点を O_1 とする。この交点 O_1 を中心とする円を考え、その円と断面歯形a-a, b-bとの交点をA, Bとする。歯車のみを回転させて、点Aが点Bに重なるまでに歯車の回転すべき角度を θ とする。円の半径を連続的に変化させて同心円の系列を作り、それぞれの同心円に対応する角 X を求める。断面歯形の有効部に対する X の最小値 X_{min} を与える弧A, Bがこの歯形どうしの接触点を与える。

ついで切断面をZ軸に沿って移動させ、各断面を与える X の最小値を与える X_{min} と各点の X の差を求める。これに対応する弧長により歯車歯面上の必要な個所の点の歯車歯面との隙間を求めることができる。

本研究で提案する鼓形ウォームギヤの歯当たり解析を数値解析によって行う。まずウォームの軸断面形状を数値計算によって求める方法について述べる。

インボリュートねじ面であるホイール歯面がウォーム歯面を包絡するので、ホイールと共に回転する座標系をウォームと共に回転する座標系に変換して、ホイール歯面をウォームに座標系において含軸断面である $O-X_1Y_1$ のホイール歯面の交線をまず求める。

インボリュートねじ面であるホイール歯面がウォーム歯面を包絡する状況を図15のように、ウォームの含軸断面で求めることができる。この図から Y_1 座標を与えて以下の方法でウォームの含軸断面形状を計算できる。まず、計算したい断面形状の $Y_1=C$ 直線を決める。ホイール歯面の回転角をパラメータとして順次変えていくと、この直線とインボリュートねじ面の断面曲線群との交点の点列 X_1, X_2, \dots, X_n は断面曲線群の包絡線であるウォーム軸断面曲線に限りなく近づいていく。この点列の近接する2点の X_1 座標値が十分小さい点を与える X_1 座標値が $Y_1=C$ に対応するウォーム軸断面形状の X_1 座標値を与える。必要な間隔で座標値 $Y_1=C$ を与えてウォーム軸断面形状の理論値を得ることができる。

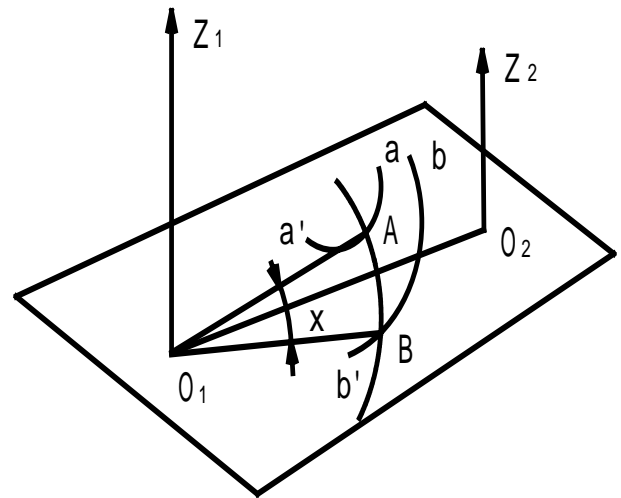


Fig.14 Explanation of method of calculation of Tooth Contact Analysis

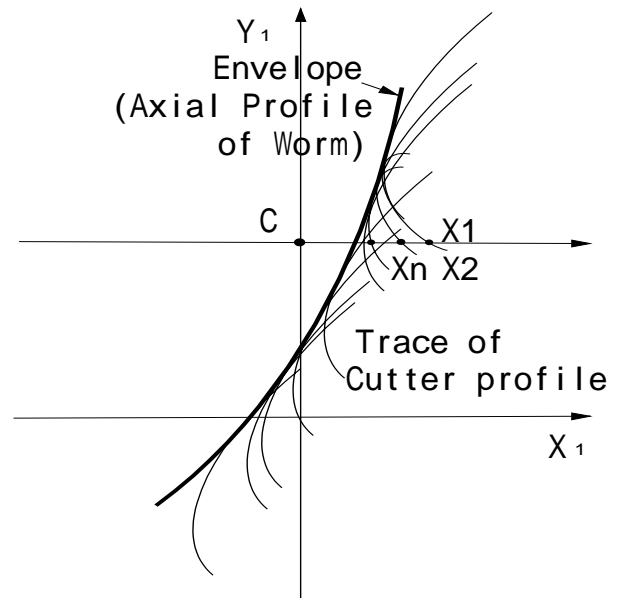


Fig.15 Enveloping of the Section of Worm Tooth by the Tooth surface of Involute Helical Gear

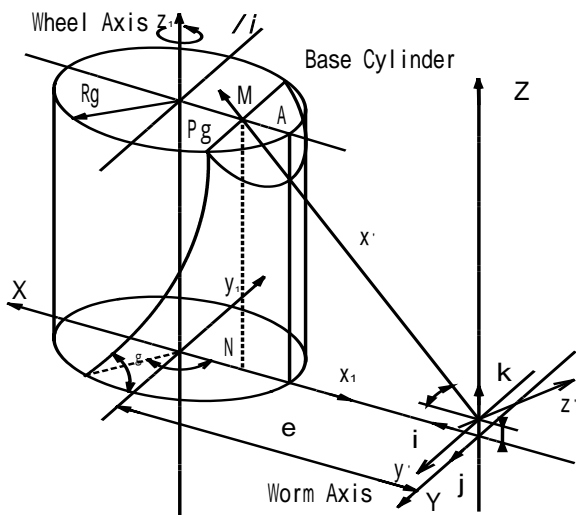


Fig.16 Explanation of the relation between Involute Helicoids and the plane parallel

$$R = \sqrt{(x_1')^2 + (y_1')^2} \quad \text{として,}$$

$$\sqrt{x_1'^2 + y_1'^2} - R = 0 \quad \text{となるを補間}$$

法により求めればよい.

このとき円弧長Lは,

$$L = R \cos^{-1} \left(\frac{x_1' x_1 + y_1' y_1}{R^2} \right) \quad \dots (4.9)$$

図18は、本節の歯当たり解析の方法を用いて、本研究で提案するインボリュートはすば歯車をホイールとする鼓形ウォームギヤの歯当たり状況を解析し、図表表示した結果を示している。

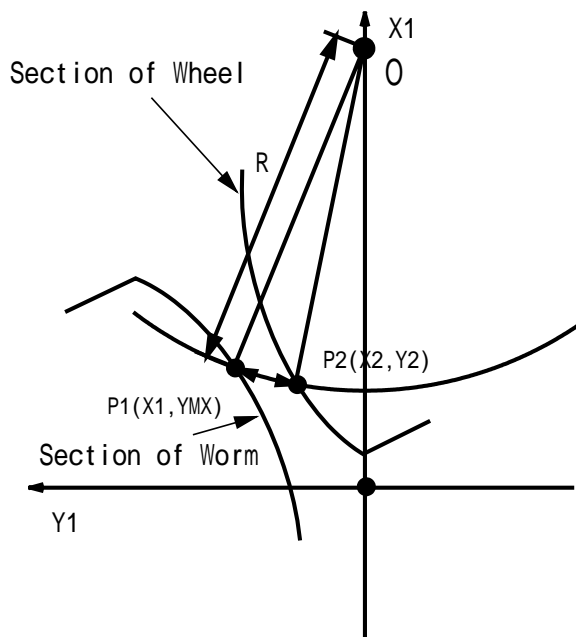


Fig.17 Explanation of getting the clearance between the tooth profiles of Worm and Wheel Tooth Section cut by the plane parallel to the Worm Axis

XYZ 直交座標系において、ホイール軸方向の高さZが一致している平面の断面歯形で考えるとき、ウォームの座標は $P1(x_1, y_1)$ であり、ホイールの座標は $P2(x_1, y_1)$ である。歯面隙間を円弧長で近似すると、

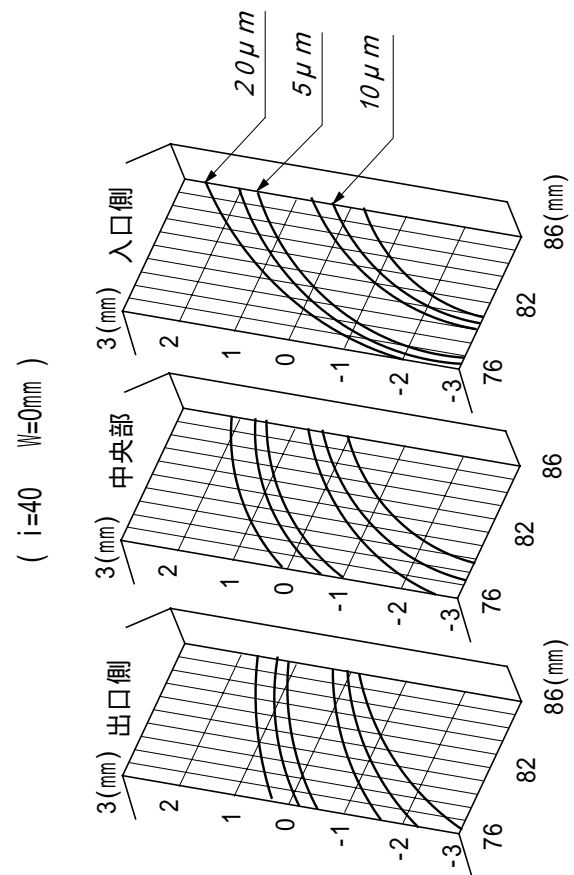


Fig.18 Result of Tooth Contact Analysis

この計算結果の鼓形ウォームギヤの諸元は軸間距離 100 mm, 減速比 40 で医療用ベッドの昇降機の減速機として実用されたものである⁽⁹⁾。

数値解析による歯当たり解析では負荷や組み立て誤差あるいは加工誤差がある場合の歯当たりがどの

ように変化するかを調査することができる。

図 18 に示す歯当たり解析の結果は正規組み立て位置の場合である。即ち組み立て誤差や負荷によるウォームのホイールに対する相対変位がない場合についての結果である。

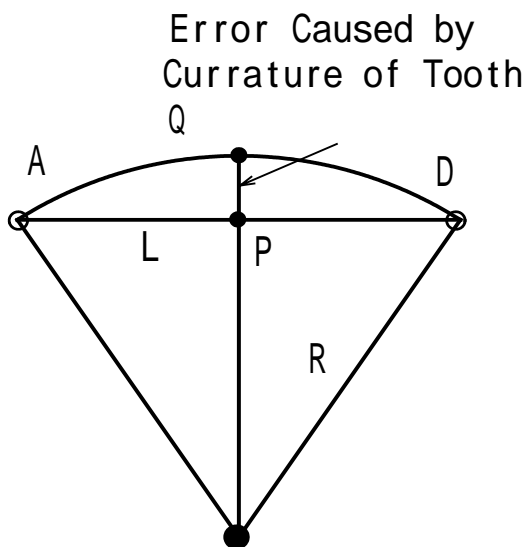


Fig.19 Explanation of calculating Relative Radius Curvature between Worm and Wheel Teeth

図 18 の歯当たり解析結果の接触線 即ち, 平行等高線より両歯面間の相対曲率半径を概算できる。いま, 両歯面の相対関係をホイールの歯面を平面に置き換えれば, 局所的には相手ウォーム歯面を円筒と考えてよい。このとき接触線に直角に切った円筒面を図 19 に示す。この図で L を両歯面の隙間, R を相対曲率半径とする。

このとき,

$$R = \frac{L^2}{8} \dots (4.10)$$

この図より, 歯当たり解析結果は図 18 の中央歯のピッチ点, すなわち歯筋方向の歯面上の座標が $Y = 77.5, Z = 0$ の位置の L は約 1mm , $\epsilon = 5 \mu\text{m}$ として, 相対曲率半径 R は 約 2.5mm となる。図 18 の計算経過において 接触線幅の数値を厳密に求めることができる。その計算結果の L の数値を式(4.10)に代入してより精度の良い相対曲率半径を求めるこ

とができる。

図 20 はウォーム歯面の歯当たりマークの写真である。歯当りは全歯面に広がっている。図 21 はホイール歯面上に現れた実験直後の歯当たりマークの写真を示す。



Fig.20 Tooth Contact Mark of Worm teeth after Running test



Fig.21 Tooth Contact Mark of Wheel teeth after Running test

5. 角度伝達誤差測定

図 22 に, 本研究の共同研究者の堀内らが開発した株式会社シンエーテック製の角度伝達誤差測定機を示す。減速機ボックスは中心距離調整可能になっており, バックラッシュを 2.8 分 (出力軸換算値) 以下に調整した。図 23 に角度伝達誤差測定結果を示す。縦軸に出力軸換算での角度伝達誤差 (ATE と略称) を 1 目盛り 30 秒 (以下は全て角度での度, 分, 秒を示

す)で表示し、横軸は出力軸回転角度を1目盛り30度で示してある。角度伝達誤差とは、入力軸回転角度を減速比倍して出力軸回転角度に換算した角度(理論回転角度)と実際の出力軸回転角度との差のことである。赤線は、出力軸がCW回転で、青線はCCW回転時のものである。CW,CCWは、同じ原点で測定されるので、この両者の差が、それぞれの位置における歯面間の出力軸換算バックラッシュとなる。これを桃色線で示す。下の図は、これを周波数分析したものである。横軸は時間軸ではなく、出力軸1回転中に現れる周期的ATE変動成分の回数を1目盛り20回で示す。縦軸に1目盛り2秒p-pのATEを示す。上下2つの図から、以下のことがわかる。

(1) ATE値は、出力軸1回転当たり約3分(180秒)p-pあるが、入力軸1回転当たりのATEは、約20~30秒p-p程度である。周期的には、下の図より、18.5回(入力軸1回転)の倍数が目立つ。

(2)バックラッシュは30秒以下で減速機として遊びの少ないことが分かる。



Fig.22 M-MATE calculating the angular transmission error

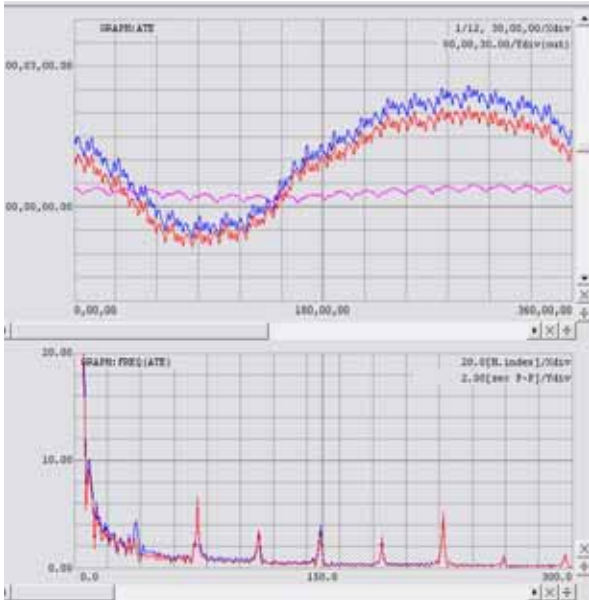


Fig.23 The angular transmission error

6. 効率試験

著者らは動力吸収式のウォームギヤ試験機を製作した。図24に試験機の写真を示す。パウダーブレーキで負荷を変え、トルク計で測定した入出力をパソコンでデータ処理を行った。



Fig.24 Power absorption type worm gear testing machine

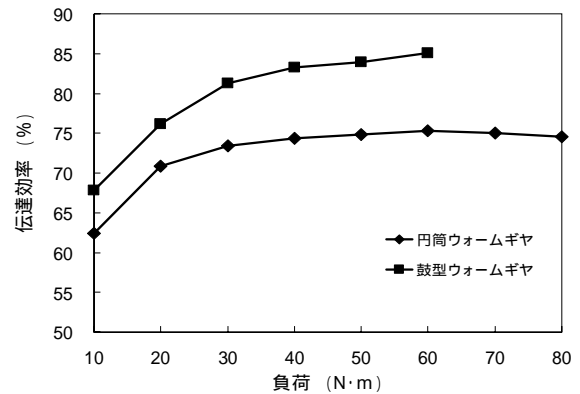


Fig.25 Efficiency of cylindrical worm gear and hourglass gear to the out put torque

図25に市販の円筒ウォームギヤと本研究の鼓形ウォームギヤの効率試験結果を示す。円筒ウォームの材質はS45Cである。歯面を焼き入れ後歯研した。

モジュール2,ホイールの歯数は40で、材質はALBCアルミ青銅ホイールである。ウォーム条数は2である。油浴潤滑で最高効率は60Nmの出力で75%を得た。

一方鼓形ウォームの材質はS45C炭素鋼生材である。ホイールの材質はMC6ナイロンで、ホブ切りした。グリース潤滑である。本減速機では中心距離調整可能になっており、バックラッシュを分出力軸換算値で2.8

min. 以下に調整した。図 25 のように鼓形ウォームギヤは 65Nm で最高効率 85% を得た。しかし、65Nm の負荷でプラスチック・インポリュートはすば歯車ホイールの歯が 5 枚破壊した。

7. 結言

著者らはプラスチック・インポリュートはすば歯車をホイールとする鼓形ウォームギヤを開発した。

アルキメデスのねじ面をウォームとし、インポリュートはすば歯車をホイールとする円筒ウォームギヤの歯当たりの状況とヒンドレーの鼓形ウォームとインポリュートはすば歯車をホイールとする鼓形ウォームギヤの歯当たり解析の図を 3D/CAD で描いて両者の性能を比較検討した。本研究で提案する鼓形ウォームギヤの歯当たり解析を数値解析によって行った。この結果より、ウォームとホイール歯面の接触線に直角な方向の相対曲率半径を精度良く求めることができることを示した。

本研究で提案する鼓形ウォームギヤ・セットを加工した。ついで、本研究の共同研究車の堀内らが開発した(株)シンエーテック製の角度伝達誤差測定機により、加工した鼓形ウォームギヤ・セットの角度伝達誤差を測定した。

動力吸収式ウォームギヤ効率試験機を製作し、このウォームギヤと市販の円筒ウォームギヤと効率試験を行った。その結果、鋼製ウォーム、ALBC アルミ青銅ホイールの円筒ウォームギヤは油浴潤滑で 60 Nm の出力で最高効率は 75% であった。

一方、本研究で提案したプラスチック・インポリュートはすば歯車鼓形ウォームギヤのウォーム材質は S45C 炭素鋼、ホイールの材質は MC6 ナイロンであり、ホブ切り、グリース潤滑である。この鼓形ウォームギヤは 65Nm で最高効率 85% を得たが 65Nm の負荷でホイールの歯が 5 枚破壊した。

謝辞

本研究には平成 2006 年度関東学院大学工学部工学会および 19 年度、同学工学総合研究所から、研究補助金受けたものであることをここに記し、感謝する。

参考文献

- 1) 上杉幸男,堀内昭世 : 新ウォームギヤ変速機 HEDCON,住友重機技報,Vol.27, No81, PP.28~31(1979).
- 2) 牧充,岡本和彦,緑川勇: はすば歯車をホイール歯面とする鼓形ウォームギヤに関する研究(第 1 報),日本機械学会論文集(C 編),61 巻,582 号,PP.362~366(1995).
- 3) ラフカディオ・ラティ:知られざるレオナルド,岩波書店, pp.
- 4) 酒井高男,牧充 : 食違い軸歯車における二度接触に関する考察,日本機械学会論文集,Vol.38, No.311, PP.1895~1904 (1972).
- 5) 豊山晃 : 転位異速方式鼓形ウォームギヤ,日本機械学会論文集,28 巻,196 号,PP.1676-1682 (1962).
- 6) 石川昌一: 修正面包絡面を有する鼓形ウォーム用ホイールのウォーム及びホイールの工作法(第一部),長谷川歯車報告書(1983).
- 7) 加藤一馬,牧 充,: パルプ開閉装置用鼓形ウォームギヤの開発,日本機械学会論文集(C 編),Vol.58, No.546,PP.263~267(1992).
- 8) 牧 充,他,: 鼓形ウォームギヤの歯当たり解析,日本機械学会論文集(C 編),50 巻,458 号. PP.28~34(1984).
- 9) 牧 充,魯 子和,他:高性能小型鼓形ウォームギヤの研究,第 2 回機素潤滑設計部門講演会講演論文集(長崎),PP.184~188(2002).