

簡易 NC ホブ盤のシステム構築と加工精度向上に関する研究

川嶋雄介*, 大泉哲哉, 熊谷和志

Retrofit of CNC Hobbing Machine and improvement of its machining accuracy

KAWASHIMA Yusuke*, OIZUMI Tetsuya and KUMAGAI Kazushi

Gears are very useful machine elements. Widely various gears are used to fabricate robots, research instruments, and so on. Some staff and students of the Sendai National College of Technology have worked to introduce a hobbing machine. We attempted to retrofit a CNC hobbing machine. We newly fabricated software servo units and a sub-computer unit using H8 microprocessors. To evaluate its performance, we also built up a gear measurement system based on CNC-3DMM. We cut some spur gears on the machine, measured their tooth profile errors, and analyzed those errors.

Keywords: Retrofit, CNC, Hobbing machine, Accuracy

1. はじめに

歯車は機械装置の内部で、運動や動力を変換・伝達するために欠かせない機構要素として使われる。創造教育の一環としてロボット等を作製する本校では、一部の学生・教員から、歯車加工機の導入が強く望まれてきた。しかし、歯車加工機は大変高価で購入することは困難である。そのような折り、東北大学からNC化の研究で用いられた小型ホブ盤が移設されたが、制御機器が譲渡されなかったため、移設後、利用されることはなかった。

本研究の目的は、移設されたホブ盤の制御システムを構築し、加工精度向上の余地があれば精度向上を試み、一般ユーザでも容易に使用可能なユーザインターフェースを実現し、本校に歯車加工環境を実現することである。

この目的のために簡易NCホブ盤の制御系にマイクロプロセッサを多用し、ソフトウェアサーボシステムを構築した。そして、実際に加工した歯車の加工誤差を確認するため、三次元測定機を用いて歯形座標を測定するシステムを作成し、得られた歯形座標から歯形誤差を算出するプログラムを構築した。そして得られた誤差の分析を試みた。

2. 制御システムの構築

移設されたホブ盤は、研究当初からホブ軸とワーク軸にDCサーボモータが取り付けられており、速度サーボアンプに速度指令電圧を印加すれば駆動可能であった。さらに、両方の軸にはロータリーエンコーダが装着されていたため、角度検出が可能な状態であった。また、垂直軸と水平軸にはステッピングモータが取り付けられており、ステッピングモータコントローラにパルス列を送信すれば駆動可能であった。

まず、DCサーボモータへ位置サーボによって速度指令を行うデジタルサーボユニットを作製した。そして、これら4軸を統括して制御するため、従計算機を作製した。これは主計算機から受信した指令値データから各制御装置への指令値を生成、分配するものである。さらに、歯車の諸元や切削条件を入力すると1制御周期に必要な4軸分の指令値を演算し、各軸の指令値をまとめた指令値データとして従計算機に出力する歯車加工プログラムを作成した。

これらの制御機器によって構成した制御システムのブロック図を図1に示す。

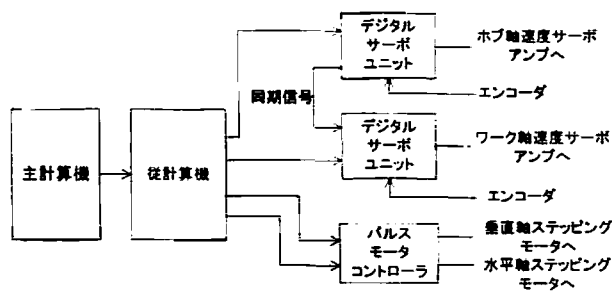


図1. 制御システムのブロック図

2. 1 デジタルサーボユニットの作製

創成運動で歯切りを行うホブ盤で平歯車を切削する場合、厳密に同期回転するように位置サーボ制御を行う必要がある。そのために元東北大学教授の江村は、精確な位置サーボ系を実現できるようフィードフォワード補償を導入したデジタルサーボユニットを考案し、遅れパルスのない高精度加工ができる高機能ホブ盤を他に先駆けて実現した[1]。

まずは、江村のデジタルサーボユニットを、H8組込型マイクロコンピュータを用いたソフトウェアサーボに置き換えることを検討した。江村のデジタルサーボユニットを、おおまかな機能ブロックで表すと図2のようになる。

これをソフトウェアサーボで実現するために、図3に示すようなシステムに変更し、式(1)のサーボエラー E を用いて、式(2)の値を速度指令電圧 V_d とする制御プログラムを作成した。

$$E = N_d - N_c \quad (1)$$

$$V_d = k_p E + k_i E_{sum} + k_d (E - E_o) + k_{FF} N_d \quad (2)$$

ここで、 N_d は1制御周期に処理すべき指令値、 N_c はエンコーダからのパルス、また、 k_p, k_i, k_d, k_{FF} は、各々、比例補償ゲイン、積分補償ゲイン、微分補償ゲイン、フィードフォワードゲインであり、 E_{sum} は E の積算値、 E_o は1制御周期前の E である。各ゲインの値は、無負荷運転でオーバーシュートをしないように各軸の応答を確認しながら試行錯誤で調整を行った。

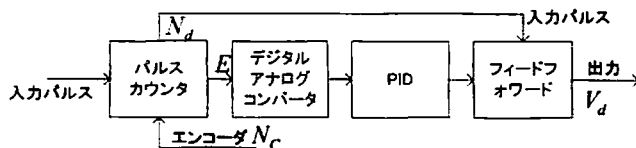


図2. 江村のデジタルサーボユニット

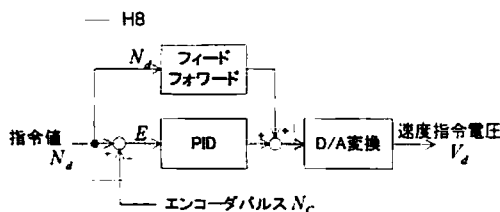


図3. 作製したデジタルサーボユニット

2. 2 従計算機の作製

従計算機は、主計算機から送信される指令値データをもとにして、これら各軸の指令値を生成、分配する装置である。シリアルポートを介して、従計算機から主計算機へ送信要求信号を送信し、指令値データを受信する。ホブ軸は切削中に回転速度を変更することがないため、最初にホブ軸の指令値データを受信し、ホブ軸への指令値はその値で固定する。これにより、指令値データを3軸分に減らすことが可能となる。デジタルサーボユニットへ送信する指令値はデジタル値なのでパラレル転送方式で送信している。ステッピングモータコントローラへの指令値はパルス列なので指令値データからDDA方式[3]によりパルス列を生成し、送信している。

2. 3 歯車加工プログラムの作成

歯車の諸元や切削条件などから従計算機へ送信すべき指令値データを演算、出力する歯車加工プログラムを作製した。歯車加工プログラムによるホブ盤の一連の動作を説明する。このプログラムへ入力設定すべきパラメータは以下になる。

- ・ ホブ軸回転速度
- ・ 垂直軸送り速度
- ・ 水平軸送り量
- ・ 被削歯車歯数
- ・ 垂直軸ストローク
- ・ 水平軸送り目標値

以下にプログラムの動作を示す。

- 1) ホブ軸回転速度の値でホブ軸が回転を始め、同時にワーク軸が同期回転を始める。
- 2) 水平軸送り量だけ水平軸がホブカッタに接近し、垂直軸が垂直軸送り速度で上昇を始め、垂直軸ストローク分上昇して、停止する。
- 3) 水平軸送り量だけワークがホブカッタに接近し、今度は垂直軸が垂直軸送り目標値まで垂直軸送り速度で下降を始め、垂直軸ストローク分下降し停止する。
- 4) 項目 2)、3) を水平軸送り量の合計が水平軸送り目標値と等しくなるまで繰り返す。

3. 動作確認

構築した制御システムの動作を確認するために歯車の切削を試みた。表1の諸元の歯車を、表2の切削条件により切削したところ、図4の歯車を切削することに成功した。

表1. 歯車の諸元

歯数	40
モジュール	2
圧力角[°]	20
歯幅[mm]	10
材料	アクリル

表2. 切削条件

ホブ軸回転速度 [rev/s]	1
垂直軸送り速度 [mm]	2
水平軸送り量 [mm]	0.3

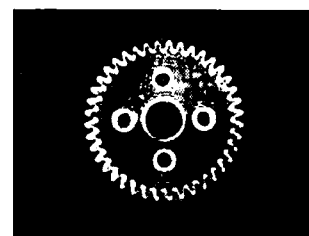


図4. 切削した歯車

4. 歯車の評価

加工誤差を確認するために、加工した歯車の測定を三次元測定機を用いて行った。三次元測定機を用いる場合、歯車の測定では、歯数分、同じ手続きの繰り返しの強いられる。そこで、歯車自動測定プログラムを構築した。また、

得られた測定座標から、歯形誤差を算出する表計算ソフトの解析用マクロプログラムを作成した。測定結果より、単一ピッチ誤差、累積ピッチ誤差、歯形誤差を求めた。

4. 1 測定方法

三次元測定機は、測定プローブの先端にあるスタイラスが触れた時のスタイラス中心座標値を得ることができる。得られた座標値から歯形誤差を算出する方法は大泉・熊谷の方法[2]を採用した。以下にその方法を抜粋する。

図5の関係から測定点 $P(x_m, y_m)$ の持つ歯形の誤差 e は、式(4)のように得られる。

$$e = S - r_g (\tan \alpha_0 + \psi) \quad (4)$$

式(4)において、 r_g は基礎円半径、 α_0 は圧力角である。また、 S と ψ は、式(5)、(6)より求めることができる。

$$S = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} - r_g \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \psi &= \alpha_m + \chi - \alpha_0 \\ &= \cos^{-1} \frac{r_g}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2}} + \tan^{-1} \frac{x_m}{y_m} - \alpha_0 \end{aligned} \quad (6)$$

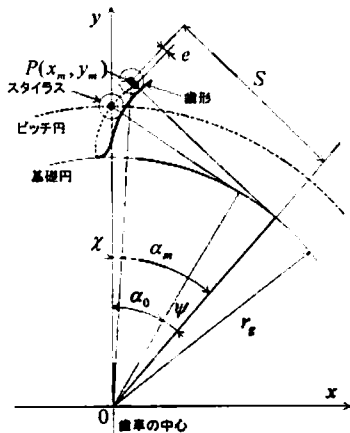


図5. 平歯車の測定点と歯形誤差の関係

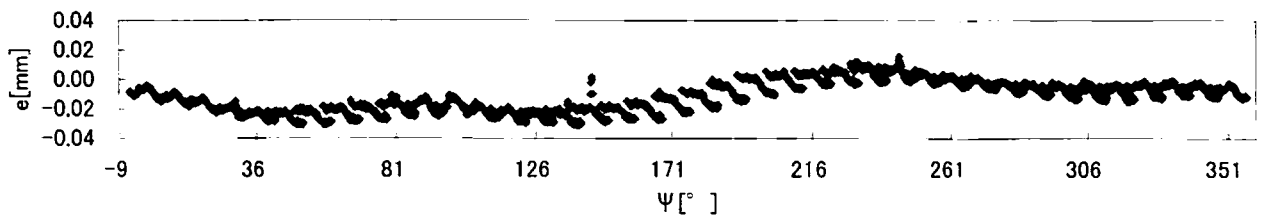
4. 2 歯形自動測定、解析用マクロプログラムの作成

使用した三次元測定機には、操作した測定手順を記録、再現するマクロ機能が備わっており、その測定マクロプログラムは編集、作成することも可能である。これを利用して、歯車を自動測定した。まず、ひとつの歯面について手動操作で歯元と歯末の2点を点測定し、この測定手順を記録する。記録された測定マクロプログラムと、点測定した2点の間で希望する測定点数を設定し、歯数分だけ繰り返すよう編集することにより歯車自動測定プログラムを作成した。

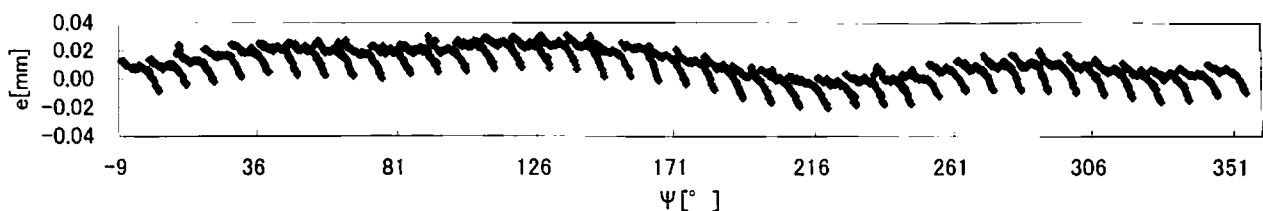
次に、歯形自動測定により得られた歯形の座標値から、大泉・熊谷の方法を用いて歯形誤差を算出する表計算ソフトの解析用マクロプログラムを作成した。それは、まず、最初に測定された歯形の測定点から、最もピッチ円に近い測定点をピッチ点と仮定し、そのピッチ点とした測定点が、図5のように、 y 軸上に配置されるよう、すべての測定点を座標変換する。そして、式(4)、(5)、(6)をもとにして測定点ごとに歯形の法線方向の誤差 e を算出し、出力するというものである。

4. 3 評価

解析用マクロプログラムより出力されたデータを図6に示す。このグラフは横軸に角度 ψ 、縦軸に歯形誤差 e をとり、一周分プロットしたものである。横軸の数値は1ピッチ $9[^\circ]$ の倍数となる角度を示している。また、図7に図6のグラフから、最初の2枚目までを抜粋したものを示す。横軸の目盛がピッチ点の位相を意味するグラフではピッチ点より左側では歯元側、右側では歯末側となる。これらの結果から隣接する歯のピッチ点における歯形誤差の差から、単一ピッチ誤差を求めることができ、ピッチ点における歯形誤差はそのまま累積ピッチ誤差とみなせる。



(a)左歯面の歯形誤差



(b)右歯面の歯形誤差

図6. 歯形誤差のグラフ

単一ピッチ誤差は $7[\mu\text{m}]$ であり、精度等級6級程度である。また、累積ピッチ誤差は $30[\mu\text{m}]$ であり、精度等級7級程度である。歯形誤差は $20[\mu\text{m}]$ となった。

ホブ盤の創成運動により切削されたインボリュート歯形の性質上、最初の歯末の歯形誤差と次に測定された歯の歯元の歯形誤差は等しくなる。つまり、グラフの見た目は一本の曲線のようになるはずである。これらの測定結果と解析マクロの結果の信頼性を評価するため、宮城県産業技術総合センターにおいて同じ歯車を測定した。図8は測定した歯形誤差を比較したものである。データは40枚分あるが、測定開始の歯から最初の2枚のみのグラフを示した。各歯のピッチ点での誤差を0としたときの各歯の歯元側と歯末側で誤差の違いが大きく出ているのは、歯車の測定中心のずれが影響していると考えられる。本校と産業技術センターの測定結果はどの歯も誤差の傾向が一致しており、本校の三次元測定機でも歯形誤差測定ができていると言える。

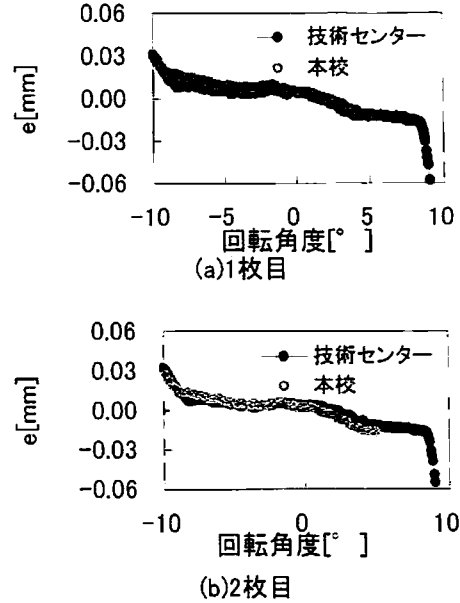


図8. 歯形誤差測定結果の比較

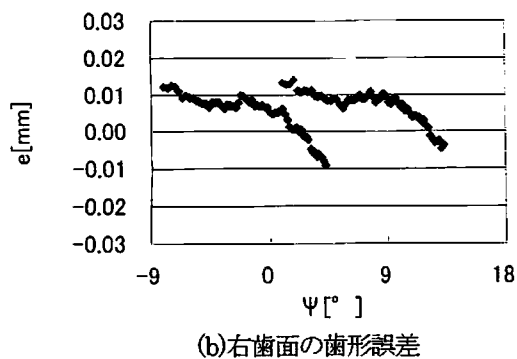
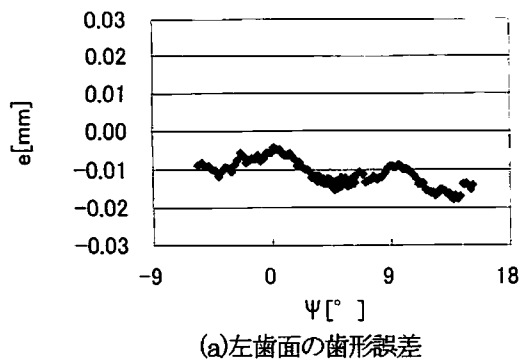


図7. 2枚目までの歯形誤差

5. 誤差の原因調査

図6から、歯車一周を、1周期、3周期、40周期とする誤差が見てとれる。1周期や3周期は、ワークテーブルの親ウオームホイールやワークテーブルの偏心、回転精度の影響が大きく、40周期の誤差、つまり、歯一枚ごとの誤差は、ホブカッタ形状誤差や、ホブの取り付け誤差の影響が大きい。

歯車を切削している最中に、ワークテーブルを指で触れてみると小刻みに振動しているのを感じとれる場合がある。歯形誤差の原因は、この振動の影響が大きいのではないかと考え、ワークテーブルの振動を測定することにした。

5. 1 ワークテーブルの振動測定

ワークテーブルの振動を測定するため、図9のように、ワークテーブルに被削歯車ワークを取り付け、カップリングを介して、ロータリーエンコーダとワークテーブルを接続した。ロータリーエンコーダの分解能は $200,000[\text{パルス/回転}]$ であり、切削した歯車の諸元と切削条件は、表1、表2と同じであるが、材料はMCナイロンである。歯車加工中、ホブ盤の垂直軸は8往復する。垂直軸が上昇、下降、ともに被削歯車の中央付近を切削している最中にロータリーエンコーダの値を記録した。

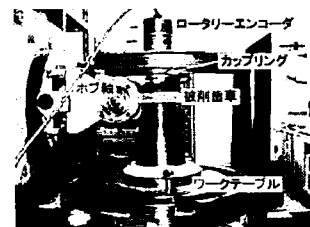


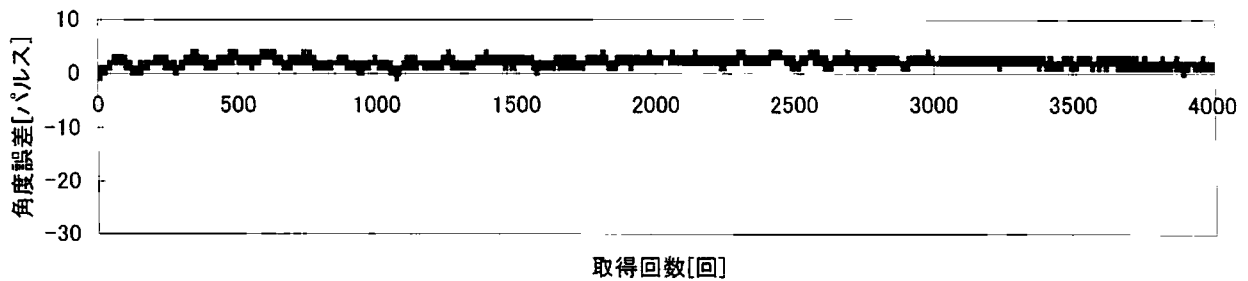
図9. ワーク回転誤差の測定

10[ms]毎のカウンタ値取得回数を横軸に、理論値との差をとった、誤差パルスを縦軸にとって、プロットしたグラフを図10に示す。

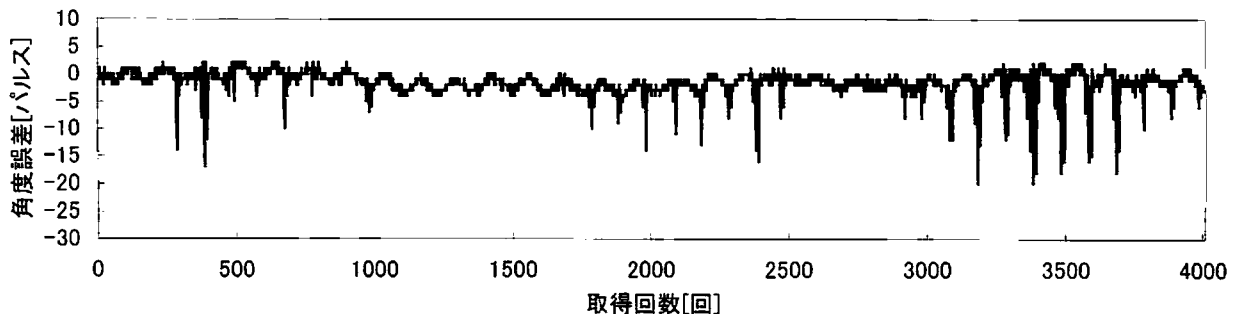
5. 2 誤差測定結果の考察

切削している歯車は歯先円半径42[mm]、歯底円半径37.5[mm]となるので、水平軸送り量の合計は4.5[mm]である。初期位置を0とすると水平軸送り位置が2.4[mm]に到達するまでは、図10(a)のように、大きな振動をすることはなく、また、指でワークテーブルに触れていても、振動を感じとることはできない。このことから、水平軸送り位置が浅い時は、切削による回転誤差への影響が極めて少ないと考えられる。図10(b)は水平軸送り位置が3.6[mm]に達したときの

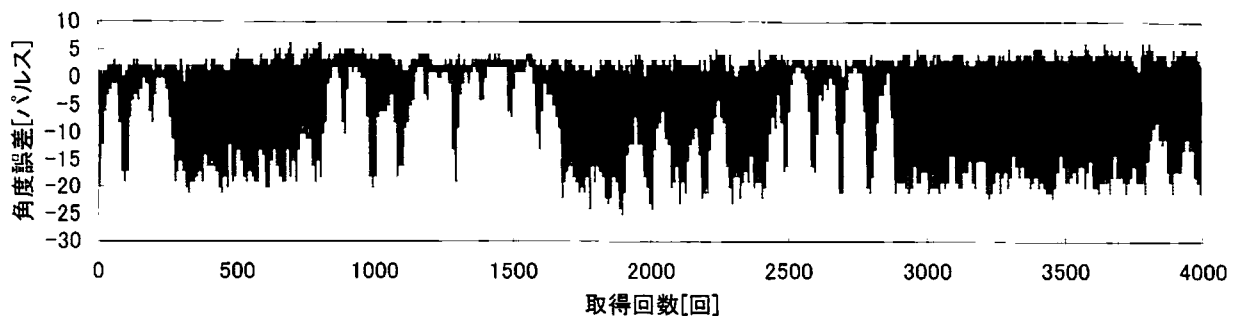
測定結果である。水平軸送り位置が2.7[mm]から3.6[mm]の間では同様の傾向であり、ワークテーブルの振動を指で感じとれる場合もある。グラフにもその影響が見てとれるようになる。図10(c)は仕上げ時のグラフである。水平軸送り位置が3.9[mm]～4.5[mm]のように深くなると、ワークテーブルの振動が大きくなり、1回転中に振動する回数も多くなる。最終仕上げ切削では、切り込み量が少ないにもかかわらず振動が起きている。水平軸送り位置が4.5[mm]に近づくほど、つまり、歯車の切削工程が最終段階に進むほど、歯形誤差への影響が大きくなっていると考えられる。そこで、図10(c)の振動の主な原因がホブカッタであることを確かめるため、図10(c)のグラフをフーリエ解析した。その結果を図11に示す。



(a)水平軸送り量 0.3mm



(b)水平軸送り量 3.6mm



(c)水平軸送り量 4.5mm

図10. ワーク回転誤差測定結果

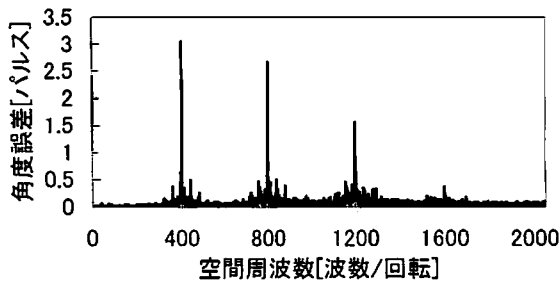


図 11. フーリエ解析結果

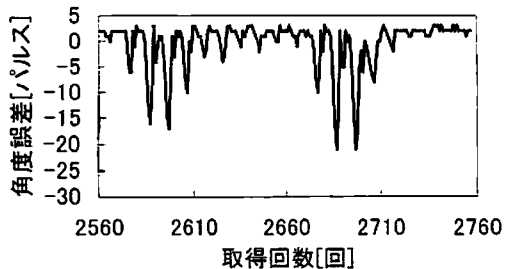


図12. 水平軸送り量4.5mmの測定結果(2560~2760)

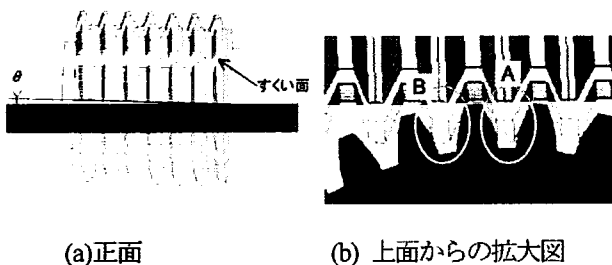


図13. ホブカッタと被削歯車の関係

図11より、図10(c)の主な振動はワークテーブルが1回転する間に、400回振動するものである。ホブカッタは1周で10枚の刃があり、被削歯車の歯数が40枚なので、振動の原因はホブカッタの刃が被削歯車と衝突するたびに生じるものである。図12に図10(c)のグラフの横軸が2560回から2760回までを抜粋したものを示す。この部分は比較的振動がおさまっている部分から、大きな振動に移行する部分を観察できるところである。振動が生じる部分に注目すると、大きな振動が発生するときは、必ず、ワークの回転が遅くなってから、その反動も加わって、回転が急激に速くなって、その後、2回ほど回転が妨げられて、回転が遅くなることを繰り返している。この遅速現象を10回繰り返して、ホブが1回転するので、ホブの切れ刃がワーク削っているときに回転が遅くなっていると考えられる。

また、ホブ軸はホブカッタの歯すじの進み角 θ だけ、水平な軸から傾け、歯スジが垂直軸と平行となるようにするので、ホブカッタのすくい面も θ だけ水平面と角度をなす。その様子を図13(a)に示す。このことによりホブカッタの隣接する刃同士は同時に被削歯車歯溝に食い込むわけではな

く、図13では右側の刃から順に、被削歯車を切削していく。噛み合い率から考えて切れ刃が食い込む衝撃は、一つのすくい面について、2~3回生じるはずで、上記の減速現象と一致する。

これらのことから、図6(b)の右歯面の歯形誤差が同図(a)の左歯面より歯末部分で大きいのはワークテーブルが本来の回転位置より遅れることで右歯面の歯先が削られてしまうことによると考えられる。また、ワークテーブルは本来の位置より遅れることはあっても、進むことはない。このことは図10、図12のグラフで角度誤差が負の方向にのみ大きくピークがあることから確認できる。また、歯形誤差が隣接している歯の結果と重ならないのはホブ軸の傾きにより、ホブカッタの刃が同時に被削歯車を切削しないことと関係していると考えている。これについてはあらたな実験などをして調査、確認していく必要がある。

6. おわりに

本研究によって以下のような成果が得られた。

- (1) ホブ盤の簡易CNC制御システムを構築し、平歯車を削り出すことが可能となった。
- (2) 三次元測定機を用いて、平歯車を自動測定し、歯形誤差を算出する測定環境を構築した。
- (3) 前項の測定環境で測定した結果を、外部での測定結果と比較することで、測定システムの妥当性を確かめた。
- (4) ワークテーブルの振動を測定し、歯形誤差の要因となっていることを考察した

今後は、歯形誤差の要因として考察した内容を実験などで確かめていきたいと考える。また、操作しやすいユーザインターフェースを構築する必要がある。

謝 辞

本研究の推進にあたり、歯車の測定、測定データの提供をしていただきました宮城県産業技術総合センター久田哲弥氏に深謝致します。また、ご指導、ご助力頂きました本校技術職員山内誠氏に感謝致します。

<参考文献>

- [1] 江村、酒井、島地：CNC ホブ盤に関する研究（試作と適用範囲の確認）、日本機械学会論文集、C 編 51 巻 465 号、pp.1034-1041 (1985)
- [2] 大泉、熊谷、江村、酒井：三次元測定機による槽円系インボリュート歯車の加工誤差測定に関する研究、仙台電波工業高等専門学校紀要、第 24 号、pp.119-134 (1994)
- [3] 稲葉清右衛門：やさしい NC 読本（日本能率協会、1986）、pp.34-37.