研 究

ホブ盤の動的割出誤差試験法*

——ホブ盤の割出性能評価に関する実験的研究(第4報)——

柳 下 福 蔵** 兼 城 清***

Procedure for Testing the Dynamic Dividing
Error of Gear Hobbing Machines
—Experimental Study on the Evaluation of
Generating Accuracy of Gear Teeth in
Hobbing Machines (4th Report)—

Hukuzo YAGISHITA and Kiyoshi KANESHIRO

Improved materials for the hob and the advanced coating technique have created a need for testing the dynamic characteristics of dividing error between the worktable and the hob in order to attain both the high-rate and high-accuracy gear cutting. One of the authors has already developed a new apparatus for measuring the dynamic dividing error between the hob and the worktable. Using this apparatus, the dynamic dividing error was measured and recorded not only during the idle running but also during machining. In this report, seven items of testing method for the static and the dynamic torsional rigidity of the rotational transmission mechanism in a hobbing machine,

which strongly affects the accuracy of the generated gear, is newly proposed by including the aforementioned method of measuring the dynamic dividing error. The seven items of testing method is carried out on a middle size precision gear hobbing machine which is one of a specific type widely employed in gear production shops. As the result, it was proved that both the high-rate and high-accuracy gear cutting condition applicable on the tested hobbing machine could be identified. The proposed testing method would also be effective for the manufacturers who use many gear hobbing machines, to examine and maintain the generating accuracy of their production equipments. The seven items of testing method proposed would be effectively applied not only to the middle size but also to the small size and the large size gear hobbing machines.

Key words: hobbing machine, generating accuracy, testing method for the dynamic dividing error, high-rate gear cutting performance.

1. 緒 論

ホブ材質がかなり改良され、コーティング技術が進歩してきた現在¹⁾、高能率・高精度の歯切加工を実現しようとする、使用するホブ盤の割出誤差に注目した振動特性を熟知しておく必要がある。筆者の一人はホブ軸とワークテーブルに適当なパルス数のロータリーエンコーダを取り付け、両信号を電気的に処理して動的割出誤差を測定・記録する装置を開発した。空転中のみならず歯切り中にも割出誤差の測定に成功し、仕上削り中の割出誤差が歯形誤差に現れる様子が周波数領域で確認されたことを報告している²⁾。本報では、その割出誤差測定法を組み込んで、歯切精度に最も強く影響するホブ盤駆動系の静的ならびに動的ねじり剛性に関する一連の試験法を新たに考案した。この一連の試験法はホブ軸スラスト方向静特性試験、駆動系のねじり静特性試験、駆動系のねじり動特性試験、ホブヘッド送り駆動系の動特性試験、

切削試験、空転試験および歯形誤差のフーリエ解析の7項目からなっている。これら一連の試験を生産現場で広く使用されている中型精密ホブ盤において実施したところ、供試ホブ盤に適する高能率・高精度歯切条件の決定、さらにホブ盤の保守・管理に役立つ結果が得られることがわかったので報告する。なお、この一連の試験法は中型ホブ盤に限らず小型および大型ホブ盤にも十分適用できる。

2. 供 試 ホ ブ 盤

供試ホブ盤はワークテーブル径360mmの中型精密ホブ盤であり、生産現場で約20年実用に供されている。図1に本ホブ盤の運動伝達系の略図を示す。

3. 割出誤差に注目した静特性および動特性試験

3.1 ホブ軸まわりの静特性試験

歯切り中にホブがスラスト方向に変位すると割出誤差となり、歯切精度に直接的に影響するだけでなく、ホブ切れ刃のチップング等の原因にもなる。ホブアーバ支持部のボルトを利用して荷重負荷用のジグを固定し、ロードセルを取り付けてアーバスラスト方向に引張り・圧縮

* 原稿受付 昭和58年1月12日。昭和57年度精機学会春季大会学術講演会(昭和57年3月23日)にて発表。

** 正 会 員 沼津工業高等専門学校(沼津市大岡3600)

*** (株)小松製作所(枚方市上野3-1-1)

Fig. 1 Rotational transmission system of a middle size gear hobbing machine tested
The numbers in circle designate gears
Uncircled numbers specify the numbers of teeth

Fig. 2 Static displacement characteristics of the hob shaft in the thrust direction (tension and compression)

の荷重を負荷した時のホブアーバの変位からホブ軸ラスト方向の静的変位特性を求めた。図2がその試験結果であり、引張り・圧縮とも負荷と除荷の間にヒステリシスが認められるが、静コンプライアンスの値は約 $0.00326 \mu\text{m}/\text{N}$ $\{0.032 \mu\text{m}/\text{kgf}\}$ と小さな値を示している。ホブアーバの曲げ方向の静的変形特性についても試験したところアーバの中央位置で約 $0.0143 \mu\text{m}/\text{N}$ $\{0.140 \mu\text{m}/\text{kgf}\}$ (ホブアーバ径は $\phi 40 \text{ mm}$) の値が得られた。

3.2 駆動系のねじり静特性試験

ワークテーブルを回転止めた状態でホブアーバに水平に取り付けたアームにロードセルを用いて静トルクを

Fig. 3 Static torsional displacement characteristics of the rotational transmission system between the hob shaft and the worktable

負荷し、その時のねじれ角変位との関係から駆動系のねじり静変形特性を求めた*。図3はその試験結果であり、切削トルク作用方向の負荷に対して約 $3.40 \times 10^{-5} \text{ rad}/(\text{N} \cdot \text{m})$ $\{3.33 \times 10^{-4} \text{ rad}/(\text{kgf} \cdot \text{m})\}$ 、逆方向がやや低く約 $2.55 \times 10^{-5} \text{ rad}/(\text{N} \cdot \text{m})$ $\{2.50 \times 10^{-4} \text{ rad}/(\text{kgf} \cdot \text{m})\}$ と求まった。

3.3 切削加振による動特性試験

1枚刃の舞いツールで切削加振した時のインパルストルクおよびインパルス力に対するホブとワークテーブル間の割出誤差の応答およびコラムに対するホブヘッドの相対変位の応答をFFT処理することによりホブ・ワークテーブル間のねじり動特性、ホブヘッド送り駆動系の固有振動数を求めることができる。特に、ホブとワークテーブル間の駆動系のねじり動特性は周波数特性のすぐれた割出誤差測定法を使用しないと求まらないものであり、前報²⁾に報告した約200 Hzまで応答する動的割出誤差測定装置を用いて初めて可能となった。この試験で良好な結果を得るためには、切込みとホブヘッドの送り量を適当に設定してインパルストルクおよびインパルス力の時間幅とピーク値を最適にする必要がある**。図4は切削加振試験の状況であり、1枚刃舞いツール、ロータリーエンコーダおよび加速度ピックアップの取付状況を示している。舞いツールで切削加振した時の動的割出誤差は、ホブ軸とワークアーバに取り付けた両ロータリーエンコーダのパルス信号を演算処理して測定できる。

* 本試験を実施する場合、適当なプリロードを負荷して駆動系の各歯車かみあい部のバックラッシュを零にした状態から測定を開始する配慮が必要である。

** 星, 中川の未発表データによる。

Fig. 4 Setup for the excitation test by the impulsive cutting with a fly cutter

3.3.1 駆動系のねじり動特性試験

切削加振時のインパルストルクと割出誤差をデータレコーダに収録し、FFT 解析装置で 32 回時間平均して求めたコンプライアンス伝達関数を図 5 に示す。ワークテーブル案内面、ホブ軸両端のすべり軸受および歯車かみあい部の減衰のために割出誤差の時間波形は急激に減衰する波形となる。図 5 のコンプライアンス伝達関数より駆動系のねじり固有振動数は位相が 90° おくれる 30 Hz 付近と 70~80 Hz 付近に認められ、いずれも良好な減衰状態を示している。

3.3.2 ホブヘッド送り駆動系の固有振動数

切削加振時に切れ刃先端に作用するインパルス力とコラムおよびホブヘッドに取り付けた加速度ピックアップの信号を変位に変換したものをデータレコーダに収録したのち、コラムに対するホブヘッドの相対変位{(ホブヘッドの変位) - (コラムの変位)}に変換して 3.3.1 節と同様の FFT 処理をした。図 6 がそのコンプライアンス伝達関数であり、ホブヘッド送り駆動系の固有振動数は約 20 Hz と求まっている。

4. 切 削 試 験

歯車素材 SCM 420 H (H_B 180~220) にモジュール 6、

Fig. 5 Torsional compliance transfer function between the hob shaft and the worktable (Time average of 32 samples)

Rotational speed of hob shaft: 180 rpm, Depth of cut: 1.0 mm, Feed of hob head: 1.5 mm/rev, Conventional cut

Fig. 6 Compliance transfer function of the feed transmission system of the hob head (Time average of 32 samples)

Rotational speed of hob shaft: 220 rpm, Depth of cut: 1.2 mm, Feed of hob head: 1.5 mm/rev, Conventional cut

歯数 33 枚の平歯車を切込み 13 mm, ホブヘッドの送り 0.50 mm/rev で荒削り, 切込み 0.44 mm, ホブヘッドの送り 0.50 mm/rev で仕上削りをホブ軸回転数 100, 150, 180 および 220 rpm と変えて切削試験を実施した。切削油剤は出光興産の SH-60 を 20 l/min 供給した。各試験における割出誤差をデータレコーダに収録したのち FFT 処理して図 7 および図 8 に示すキャンベル線図を作成した。使用ホブは SKH 56 相当, JIS 1 級, 1 条, 10 溝, 外径 115 mm であり, 切れ刃の断続周波数およびその高次周波数を同図中に示した。図 7 の荒削り時のキャンベル線図において, ホブ軸回転数 100, 150, 180 およ

Fig. 7 Campbell's diagram of the dividing error during rough cut
 Spur gear, Module; 6, Number of gear teeth; 33,
 Gear blank material: SCM 420 H (H_B 180-220), Depth
 of cut; 13 mm, Feed of hob head; 0.5 mm/rev

Fig. 8 Campbell's diagram of the dividing error during finish cut
 Spur gear, Module; 6, Number of gear teeth; 33,
 Gear blank material: SCM 420 H (H_B 180-220), Depth
 of cut; 0.44 mm, Feed of hob head; 0.5 mm/rev

び 220 rpm の全割出誤差成分に注目すると、20~50 Hz、特に 30 Hz 付近の断続周波数と一致する割出誤差が最も

大きく、次にホブの回転周波数と一致する割出誤差および 70 Hz 付近の割出誤差が大きく認められる。ホブの回転周波数に原因する割出誤差はホブ取付けの偏心、切れ刃先の不整いによるものであり、一方 30 Hz 付近および 70 Hz 付近の割出誤差は切削加振で求めた(図 5)駆動系のねじり固有振動が切れ刃の断続による強制力によって励起され大きく現れている。図 8 の仕上削り時の場合は切削トルクの変動量が小さいため荒削り時の場合ほど顕著でないが 20~40 Hz 付近の割出誤差が幾分大きく現れている。ホブ軸回転数が 180 rpm の場合、30 Hz に認められる大きな割出誤差成分は切れ刃の断続周波数、駆動モータの回転周波数および駆動系のねじり固有振動数とが合致したために発生した共振現象と考えられる。

図 1 に示した供試ホブ盤の運動伝達系図より、各運転状態における各歯車の回転周波数とかみあい周波数およびベルトの回転周波数を算出し、仕上削り時のキャンベル線図と対照すると図 8 中に示すようにホブの回転周波数、ウォーム ⑬ とウォームホイール ⑭ のかみあい、ホブ軸駆動用かさ歯車 ④、クラッチ軸歯車 ⑦、⑤、⑨ およびベルト回転周波数に起因する割出誤差が明確に認められる。前報²⁾と同様、歯形誤差の記録結果にフーリエ解析法を適用すると、ホブの回転、ウォーム ⑬ とウォームホイール ⑭ のかみあい、ホブ軸駆動用かさ歯車 ④、クラッチ軸歯車 ⑦、⑤、⑨ に起因する歯形誤差が確認され、特にホブの回転に起因する歯形誤差が最も顕著であった。

5. 空 転 試 験

切削試験と全く同一条件で空転して割出誤差をデータレコーダに収録したのち FFT 処理して空転時のキャンベル線図を作成した。図 9 がその結果であり、図 1 に示す供試ホブ盤の運動伝達系に基づいて運転状態における駆動系各歯車の回転周波数とかみあい周波数およびベルトの回転周波数を算出し、割出誤差成分の周波数と比較することより各割出誤差成分の原因箇所を推測すると、同キャンベル線図中に記入したように求まる。供試ホブ盤は約 20 年間生産現場で使用されてきたものであり、ワークテーブル駆動用のウォーム ⑬ とウォームホイール ⑭ かみあい部の摩耗がかなり進行していると推測でき、その部分のバックラッシュ量の再調整が必要と思われる。さらに、ホブ軸回転周波数が高速になる程ベルト回転周波数に起因する割出誤差が増大しており、ベルトを新しいものに交換することによって改善できるものと考えられる。

6. 試験結果の評価および検討

割出誤差に注目した一連の振動解析試験結果をまとめ

Fig. 9 Campbell's diagram of the dividing error during idle running
Indexed number of gear teeth; 33, Feed of hob head is not driven

ると次のように要約される。

- (1) 静的剛性値は十分大きい。
- (2) 駆動系のねじり固有振動数は約 30 Hz および 70 ~ 80 Hz にあり、断続周波数がこれに合致しないことが必要である。
- (3) 空転試験の結果、ウォームとウォームホイール間のバックラッシュ量の再調整および V ベルトの交換は割出精度向上に効果が大きい。
- (4) 歯形誤差はホブ回転に起因する成分が最も大きく、そのほかにベルトの回転、クラッチ軸歯車およびウォームとウォームホイールに起因する成分が認められる。

本ホブ盤について具体的な改善策としてあげうるものはウォームとウォームホイールかみあい部のバックラッシュ量の再調整および V ベルトの交換の二つであり、運転条件としてはホブ軸回転周波数を切れ刃の断続周波数が駆動系のねじり固有振動を励起しないように、しかもできるだけ高速側に設定することにより高能率・高精度の歯切加工が実現できるものと予測される。

ウォームとウォームホイール間のバックラッシュ量をホブ盤メーカ指定の測定法でワークテーブル全周にわたってウォームホイールの各歯位置で測定したところ、約

Fig. 10 An example of the accuracy of a gear tooth generated by a hob having the coated layer of TiN on the rake face

0.07~0.10 mm と求まった。この値はホブ盤メーカの推奨値 0.03~0.05 mm の約 2 倍である。そこで、複リードウォームを軸方向に適量移動し、バックラッシュ量を約 0.03 mm に調整し直して空転試験を実施したところ割出誤差は約 1/20 に減少するという良好な結果が得られた。

7. 高能率歯切試験

割出誤差に注目した一連の振動試験結果に基づいて、ホブ盤駆動系のねじり固有振動数とホブ切れ刃の断続周波数が共振して割出誤差が増大する領域を避けるようにホブ軸回転数を設定することにより、高能率ホブ切りの可能性が予測できる。

供試ホブ盤のホブ・ワークテーブル間の駆動系のねじり固有振動数は約 30 Hz および 70~80 Hz と確認された。そこで、ホブ切れ刃の断続周波数が 40~60 Hz となるような高速ホブ切りを 4 章の切削試験で実施したのと全く同一歯車素材 SCM 420 H (H_B 180~220) に全く同一平歯車 (モジュール 6, 歯数 33) を切込み 13.5 mm, ホブヘッドの送り 1.5 mm/rev のクライムカット 1 回切りで実施した。使用ホブは切削速度が 100 m/min 以上の高速になるため、逃げ面摩耗に対して効果のある TiN コーティングしたものとし、ホブの母材および形状は 4 章の切削試験で使用したものとほぼ同一で、SKH 55 相当, JIS 1 級, 1 条, 10 溝, 外径 125 mm である。

ホブ軸回転数 260 rpm (切削速度 102 m/min), 308 rpm (121 m/min) および 380 rpm (149 m/min) の高能率歯切試験の結果から得られた歯切精度の一例を図 10 に示す。図 10 はホブ軸回転数 380 rpm (切削速度 149 m/min) ですくい面に TiN コーティング層がある場合

Fig. 11 Tool life diagram of the hob used in the high-rate cutting test

の歯形誤差および歯筋誤差を示している。ホブ軸回転数 260 rpm および 308 rpm の場合にも図 10 と同程度の歯切精度が得られ、切込み 13.5 mm, ホブヘッドの送り 1.5 mm/rev の 1 回切りという高能率なホブ切りを実施しても、4 章の歯切試験で 2 回切りした歯車とはほぼ同精度の歯車がホブ切りできていることが確認された。

このような高能率ホブ切りが加工現場で実施可能かどうかを確認するために、逃げ面摩耗幅 0.6 mm を寿命判定基準* としてホブの寿命試験を実施した。被削歯車, 使用ホブは前述したものと全く同一であり、切込み 13.5 mm, ホブヘッドの送り 1.5 mm/rev でまずホブ軸回転数 260 rpm (切削速度 102 m/min) で逃げ面最大摩耗幅が 0.6 mm になるまで歯切りし、次にホブをシフトしてホブ軸回転数 308 rpm (切削速度 121 m/min), さらにホブ軸回転数 380 rpm (切削速度 149 m/min) で寿命になるまで歯切りしたのちホブを再研削し、このサイクルを 3 回繰り返してホブの寿命線図を作成した。図 11 がその結果であり、横軸の切削長さはホブが寿命に達するまでの被削歯車の (歯幅) × (歯数) である。同図より、ホブのすくい面に TiN コーティング層がある場合とない場合で寿命が明確に異なり、TiN コーティング層がある方が寿命が 2 倍以上長くなっていることがわかる。現在、加工現場で実施されている同一歯車の歯切条件は普通ホブを使用して切削速度約 40 m/min の 2 回切りであり、それでも切削長さ 40 m 位でホブが寿命に達することを考慮すると図 11 中の切削速度 102 m/min (ホブ軸回転数 260 rpm) の高速ホブ切りが TiN コーテッド高速度工具鋼 (HSS) ホブを使用して経済的にも十分実施

* モジュール 6 の場合、加工現場で実施されているホブの寿命判定基準である。

可能であると判断できる。切削速度 102 m/min の高速ホブ切りが実施されると切削速度は現行の約 2.5 倍、2 回切りを 1 回切りとすると合計約 5 倍の歯切能率の向上が期待できる。

8. 結 論

ホブ盤の振動特性を割出誤差を指標に求める試験法を新たに考案し、ホブ盤の保守・管理を実施したのち高能率歯切条件を決定してその可能性を試験したところ以下のことが明らかとなった。

- (1) 割出誤差に注目して新たに考案した動特性試験法はホブ軸スラスト方向静特性試験、駆動系のねじり静特性試験、駆動系のねじり動特性試験、ホブヘッド送り駆動系の動特性試験、切削試験、空転試験および歯形誤差のフーリエ解析の 7 項目からなっている。
- (2) 本試験で新たに採用した 1 枚刃工具の切削加振によるインパルス応答試験はインパルスの時間幅の微妙な調整が可能だけでなく大きな加振エネルギーが供給できる長所があり、必要な工具および取付けジグをあらかじめ製作しておけばホブ盤に限らずほかの工作機械にも加工現場で容易に実施できる便利な加振法である。
- (3) 空転試験で作成した割出誤差のキャンベル線図と駆動系図を対照することより、駆動系の異常箇所の診断が可能であり、歯形誤差のフーリエ解析結果はその異常箇所が歯切精度に及ぼす影響を明確にする。
- (4) これらの技術はホブ盤に限らずほかの工作機械設備の保守・管理に合理的に利用できよう。
- (5) 一連の振動解析試験結果より、供試ホブ盤で可能と考えられる高能率ホブ切りを TiN コーテッド高速度工具鋼 (HSS) ホブを使用して実施したところ、ホブの寿命を考慮しても切削速度 102 m/min の高速ホブ切りが十分実施可能なことがわかり、現行の約 5 倍の加工能率の向上が達成できることが判明した。

本研究は筆者の一人が豊橋技術科学大学に内地留学中に実施されたものであり、ご指導賜りました同学・星鉄太郎教授、実験に協力いただきました当時大学院生・中川昌夫君、吉富靖君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会：歯車の製作とその運転技術に関する調査研究分科会・研究成果報告書 (1981)。
- 2) 柳下福蔵：動的割出誤差の一測定法, 精密機械, 48, 8 (1982) 1022。