

超硬ホブ切りによる高速歯車加工

High Speed Gear Cutting by Carbide Hobbing

京都精機製作所 鍋倉正和*¹ 鹿毛博文*¹
中村容造*²

歯車の高能率加工及び作業環境改善のために、超硬ホブ切りが再び注目を集めている。これまで超硬ホブ切りの普及を阻んでいた工具寿命の不安定さを次の新技術の導入により解決した。(1)高速切削に対応でき、高剛性でかつ制振機能を有する主軸構造及び、ギャトレンの遊びを抑えたテーブル構造を持つ超硬ホブ盤の開発。(2)ホブ材種の開発と切りくず形状の解析に基づく最適ホブの設計及び、逆巻きコンベンショナル加工法の採用。(3)工具の熱亀裂の発生が少ないドライカットの採用。これら新技術を採用した三菱 NC 超硬ホブ盤 GS 20 CNC を開発し、従来のハイスホブ切りの2倍の高能率加工が可能となった。

There is renewed interest in carbide hobbing due to its high productivity and its pollution-free gear cutting method. In this paper, the authors introduce a 2nd generation carbide gear hobbing process. (1) Development of a carbide hobbing machine. Main spindle with viscous damping and backlash-free table drive prevents chipping of hob and extend tool service life. (2) Refined carbide material, suitable cutter design and reverse hand hobbing also extended tool service life. (3) Dry cutting suppresses the thermal cracking of the carbide hob and offers higher cutting speed and a clean workshop. Mitsubishi NC Carbide Hobbing Machine GS 20 CNC has twice the productivity of the conventional H.S.S hobbing machine.

1. はじめに

自動車業界を中心とする量産歯車の歯切り加工には、コーティング付きハイス工具を用いたホブ切りが一般に採用されている。高能率加工のニーズに応じるため、それまで焼入れ後の仕上げ加工分野で実用化されていた超硬ホブ切りを、焼入れ前のワークのむく切りにも適用することが1980年頃に提案されたが、一部のユーザを除いてはほとんど普及していない。この理由として、ホブ切りは断続切削で切刃に衝撃荷重が加わるため、超硬のような高脆性材料の工具ではチッピングを生じやすく、工具寿命の管理が難しいことが挙げられる。しかし、今後一層の高能率加工の実現と、工場内の作業環境改善に向けて、超硬ホブの採用が必要であるという認識が広まりつつある。

1993年のヨーロッパ工作機械見本市以降、多くの歯切り機械メーカーがこの問題を克服し、超硬ホブ切りを提案している。当社でも超硬工具損傷の問題に積極的に取り組み、加工機の制振技術、工具の改善、加工法の改良によって問題を解決し、超硬ホブ切りを実用化した。本報では、1980年頃の第一世代、最近の第二世代の超硬ホブ切りの特徴を整理し、最近の超硬ホブ切り加工技術について紹介し、開発した三菱 NC 超硬ホブ盤 GS 20 CNC での加工結果を報告する。

2. 超硬ホブ盤

超硬ホブ盤の開発に当たり、第一世代の特徴及び普及を阻んでいた理由について分析し、第二世代の超硬ホブ盤に必要な機能について検討を加えた。

第一、第二世代超硬ホブ切りの特徴を表1に、超硬ホブの寿命を左右する要因分析を表2に示す。これらから明らかとなった超硬ホブ切りに要求される主なコンセプトは次のとおりである。

- (1) 超硬ホブ切りに適した高速加工が可能なこと。
- (2) 超硬ホブの切刃の被削材への食付きを良くするため機械は剛性が高く、主軸、テーブル軸ギャトレンに遊びがないこと。

表1 第一、第二世代超硬ホブ切りの特徴

Characteristics of 1st. and 2nd. generation carbide hobbing

区分	項目	第一世代	第二世代
機械	主軸モータ	油圧モータ	NCスピンドルモータ
	制振	ゴムカップリング	イナーシャダンパ
テーブル	制振	マスタウォーム	マスターギヤ
	テーブル		バックラッシュ除去装置
工具	形式	超硬チップろう付けホブ	一体型ホブ
	材種	P20系	P20系
	表面処理	なし	TiNコーティング
	ホブ外径	100 mm以上	70~90 mm
	ホブ条数	1	1~3
	切刃溝数	10~12	16~30
加工法	加工法	逆巻きコンベンショナル	逆巻きコンベンショナル*
	切削速度	150~200 m·min ⁻¹	250~400 m·min ⁻¹
	切削油剤	使用(ウエット)	なし(ドライ)

*: はすば歯車を加工する場合においてワークのねじれ方向に対し、逆のねじれ方向のホブを使用する加工法。

表2 工具寿命を左右する要因と対策

Factors and countermeasures for tool life elongation

項目	要因	対策		
		工具	機械	加工法
チッピング	衝撃荷重	多刃化(16以上) 切りくず厚みを減らす 同時かみあい刃数増	振動の抑制 遊びをなくす	逆巻きコンベンショナル加工
熱亀裂	刃先温度変化	耐熱性向上 コーティング 多刃化		切削速度を下げる ドライカット
逃げ面摩耗	ワークとの接触圧及び接触時間	切りくず長さを短くする コーティング 多刃化 多条化	遊びをなくす	逆巻きコンベンショナル加工

- (3) 超硬ホブのチッピングを防止するため、振動が小さい加工法を選ぶこと。主軸の振動に対する減衰特性を高めること。
- (4) 工具寿命向上のため、できるだけ短い切りくずを出す加工法とし、切刃の熱亀裂抑制のため、発熱を抑え、かつ刃先の温度

*1 技術部工作機設計二課主務

*2 技術部設計課

変化が小さいこと。

2.1 高速・高剛性化

超硬ホブで焼入れ前ワークのむく切りをする場合、切削速度は $250\sim 400\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ が工具寿命に最適である⁽¹⁾。この条件を満足するためには最高回転速度 3000 min^{-1} の主軸及び同 300 min^{-1} のテーブル軸が必要である。これは従来のハイスホブ盤仕様機のそれに比べ約2倍で、特にテーブル軸が問題となる。従来のマスタウォーム方式では高速化に限界があるため、焼入れした大径のマスタギヤ方式を採用した。さらにテーブルの遊びを発生する側に切削力が作用する逆巻きコンペンショナル加工に対応するため、バックラッシュ除去装置を採用し、ギヤトレンの遊びを抑えている。

2.2 イナーシャダンパ

ホブ軸回転方向の振動を抑えるために、主軸用に粘性による減衰効果を利用したイナーシャダンパを開発した。主軸の振動特性の分析結果を図1に示す。図中斜線部が効果のあった部分で、従来のフライホイールを取付けた場合に比べコンプライアンスを大幅に低減することができた。この結果、加工中のホブヘッドの上下方向の振動変位が $1/5$ と大幅に低減しており、ホブ切り時の振動低減すなわち、超硬ホブのチッピング防止にイナーシャダンパが効果のあることが確認できた。

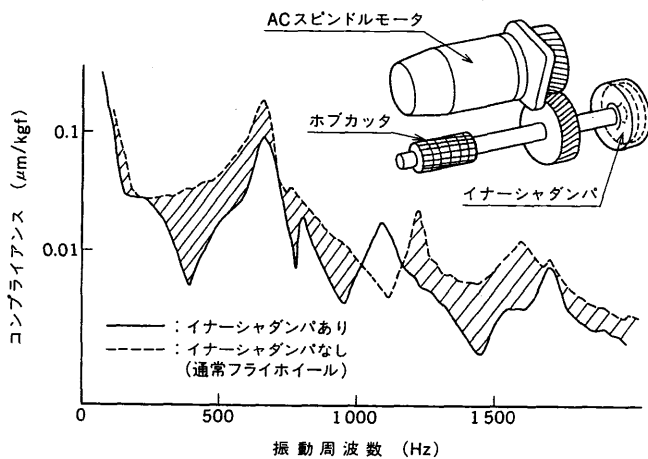


図1 主軸系の振動特性 イナーシャダンパと通常のフライホイールを装着した主軸のコンプライアンス測定結果、斜線部が低減効果部分。
Characteristics of cutter spindle rotary vibration

2.3 ドライカット対応

4.2節にて記述するドライカットは超硬ホブの熱亀裂抑制に効果があるが、一方では切削油剤による加工熱の除去作用がなくなるためワーク温度が上昇する。また飛散する高温の切くずにより機械温度が局部的に上昇する。そこで、冷却したエアを加工部に吹付けワークの冷却と切りくずの排出を行った。また機械温度の安定化と切りくず排出のためベッド上面のフラッシングを行った。

2.4 三菱NC超硬ホブ盤GS 20 CNC

超硬ホブ切りに必要なコンセプトに基づき三菱NC超硬ホブ盤GS 20 CNCを開発し1994年の大阪工作機見本市で発表した。本機の外観を図2に主要仕様を表3に示す。

3. 超硬ホブ切りのメリット

超硬ホブ切りのメリットには、生産性及び加工精度の向上ばかりでなく作業環境の改善も挙げられる。

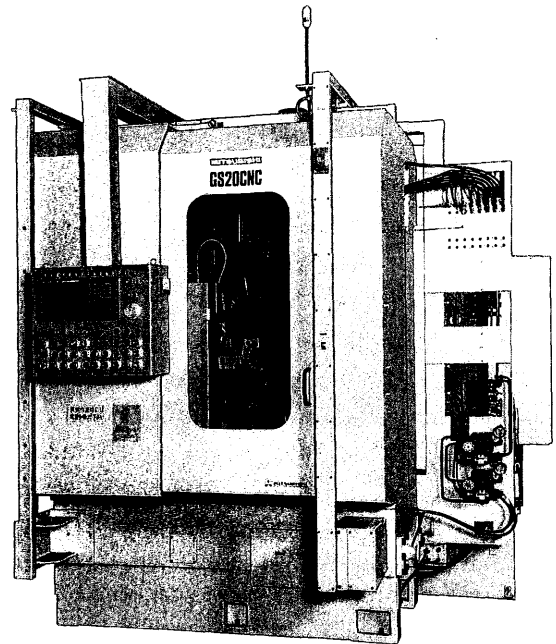


図2 三菱NCホブ盤GS 20 CNC 外観図
Mitsubishi NC Carbide Hobbing Machine GS 20 CNC

表3 三菱NC超硬ホブ盤GS 20 CNCの主要仕様
Main specifications of Mitsubishi NC Carbide Hobbing Machine GS 20 CNC

項目	仕様
ワーク最大径	200 mm
最大切削モジュール	4 mm
アキシャル移動距離	250 mm
ラジアル移動距離	140 mm
ラジアル移動方式	コラム移動
ホブ最大径	130 mm
ホブ最大長さ	230 mm
ホブシフト移動距離	180 mm
ホブ軸最高回転速度	3000 min^{-1}
テーブル軸最高回転速度	300 min^{-1}
アキシャル早送り速度	$10000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
ラジアル早送り速度	$10000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
ホブシフト早送り速度	$2500\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$
割出し歯数	4~1000 枚
メインモータ出力	7.5 kW
ホブヘッド旋回角	$\pm 45^\circ$
機械重量	6.5 t

3.1 生産性の向上

超硬ホブ切りでは切削速度を従来のハイスホブ切りに対し2~3倍高速化できる。また、一体型の超硬ホブとすることで、ハイスホブと同様多条化が可能となり、ホブ切刃1刃当たりの切削負担を軽減できるため高送りも可能となり、生産性はハイスホブに比較し2~3倍に向上している。

3.2 加工精度

超硬材は鉄材との親和性が低いので構成刃先が発生しにくい。このため、ワーク加工面がむしれにくく、面粗さが向上する。ハイスホブでは $R_{\text{max}} 12.5\mu\text{m}$ 程度であるが、超硬ホブを使用すると $3.5\mu\text{m}$ 程度の面粗さが得られた。また、歯形、歯すじ、ピッ

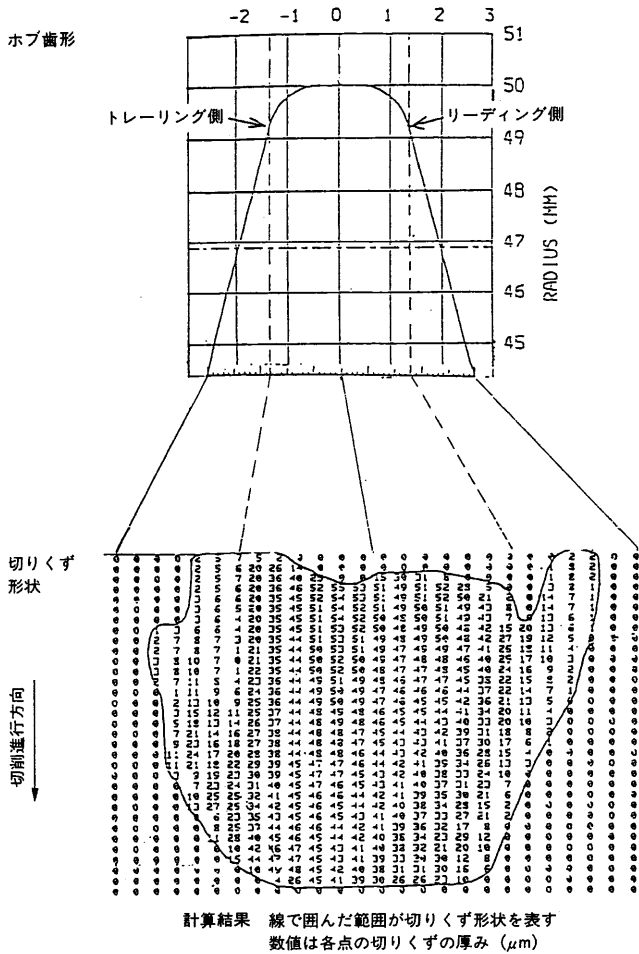


図3 切りくず形状の計算 切刃の各点が加工する切りくずの長さ、厚み及び断面積の計算例。
Calculation of uncut chip shape on hobbing

チ等の加工精度も JIS 2 級のものを得ることができるので、後加工のシェービング仕上げを省略できた事例もある。

3.3 環境改善

ハイスホブ切りでは、歯面粗さ向上のために一般的に塩化脂肪油系の切削油剤が用いられている。しかしながら、塩素系切削油剤は廃油処理のコストが高い。また、加工時に発生する油煙は除去が難しいため、作業環境悪化の原因となっている。ドライカットを採用することにより上記2点の問題を解決することができる。

4. 工具寿命の改善

第二世代の超硬ホブの特徴は、表1に示すように、小径化、多刃化及び表面処理を可能とするため、超硬チップのろう付けホブから一体ホブに形式を変えたことである。

超硬ホブの工具寿命を決定する要因を大別すると、チッピング、熱亀裂及び摩耗がある。それぞれの原因と対策は表2に示すとおりである。

4.1 チッピング

第二世代のホブは切刃溝数を増やすことで、1刃当たりの切削負荷を軽減するとともに、同時かみあい刃数を増やし、切削力の変動を低減している。これにより、切刃に加わる衝撃力を低減し、主軸に取付けたイナーシャダンパで振動を減衰させるため、切刃のチッピングを防ぐことができる。

4.2 熱亀裂

切削油を使用した場合、加工中に高温になった切刃が非切削時

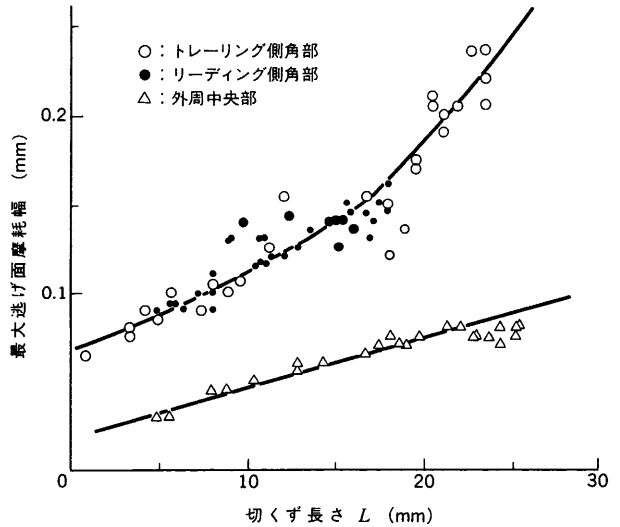


図4 切りくず長さ最大逃げ面摩耗幅 各切刃の摩耗と切りくず長さの関係、相関があることが分かる。
Relationship between uncut chip length and flank wear

に急激に冷やされ、温度差で熱応力が発生し、熱亀裂が生じる。

超硬材は高温強度が高いためドライカットが可能である。そこで、第二世代ではドライカットを採用することにより、熱応力を低減し熱亀裂の発生を抑制している。また、ホブ切刃の多刃化により1切刃当たりの切削分担量を減らし発生熱そのものを低減している。

4.3 摩耗

超硬ホブの工具寿命は、切刃の逃げ面に生じる逃げ面摩耗により支配される。そこで、ホブの各切刃が削り出す切りくずの形状と逃げ面摩耗の関係について調べた。

ホブ切りでは多数の切刃が切削に関与し、それぞれが異なる形状の切りくずを出す。このため、図3に示すように各切刃を50点に分割し、各々の点において発生する切りくずの長さ、厚み、及び断面積をコンピュータにより計算した⁽²⁾。次に実切削を行い各切刃の摩耗量と切りくず形状との相関を調べた。その結果を図4に示す。各切刃の最大逃げ面摩耗は最大切りくず長さを発生させる部分に生じており、逃げ面摩耗量は切りくず長さと強い相関があることが分かった。これにより、超硬ホブ切りでは切りくず長さを短くするよう、ホブ設計及び加工法を選択すれば、摩耗が低減できる。切りくず長さが最も短い逆巻きコンベンショナル加工は超硬ホブ切りに適した加工法である⁽³⁾。

5. 超硬ホブ切り試験

開発した三菱 NC 超硬ホブ盤 GS 20 CNC を用いて加工試験を実施した。

5.1 加工法の比較

逆巻きコンベンショナル加工と同巻きクライム加工との比較試験を行った。加工条件及び、工具摩耗の比較を図5に示す。

同巻きクライム加工では加工開始後3個目でチッピングが発生し工具寿命に至った。一方、逆巻きコンベンショナル加工ではホブシフトなしでワーク切削長90m以上の加工が可能で、工具寿命に対して有効であることが確認できた。

5.2 湿式と乾式加工(ドライカット)の比較

切削油を使用する場合と使用しない場合の比較試験を実施した。加工条件及び、工具摩耗の測定結果を図5に示す。切削油剤を使用すると、加工開始後30個目でホブの刃先に熱亀裂が発生し

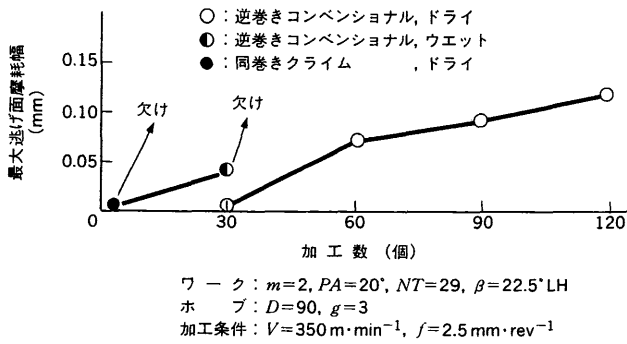


図5 加工法の比較 同巻きクライムと逆巻きコンベンショナルの比較。切削油使用(ウェット)と、使用しない(ドライ)場合の比較、同巻きクライムでは3個目で欠け発生、ウェットでは30個目で熱亀裂により欠損。
 Comparison of wear between climb cutting and reverse hand conventional cutting and comparison of flank wear between wet and dry cutting

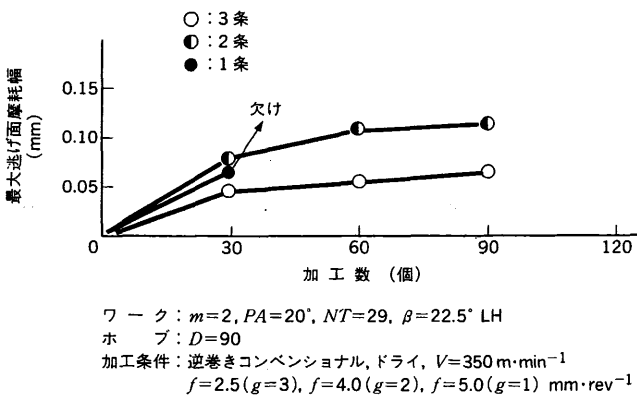


図6 ホブ条数の影響 1条ホブでは早期に欠け発生、ワークとの接触時間が長いため発熱量が大きく、熱亀裂が発生しやすい。
 Effect of number of hob starts to flank wear

欠損に至った。一方ドライカットではホブシフトなしでワーク切削長90m以上の加工が可能で、ドライカットの有効性が確認できた。

5.3 ホブ条数の影響

条数1, 2, 3のホブを用い、ほぼ一定の加工能率で、ホブ条数の工具寿命に及ぼす影響について調査した。

結果を図6に示す。1条ホブでは早期に熱亀裂からチッピングが発生し工具寿命となっている。同能率の加工の場合には、多条化が有利であることが確認できた。

5.4 切削条件の影響

加工能率がほぼ一定となるようにして、切削速度と送り速度の影響について比較した。

結果を図7に示す。同加工能率では、切削速度を下げ、送りを上げた方が摩耗が小さく、熱亀裂も小さいことが分かった。

5.5 加工熱の影響

発熱が加工精度、特に歯厚(オーバポール寸法, 以下O.B.D)に及ぼす影響について試験した。100個のワークの連続加工を行いO.B.Dを測定した。加工直後はワークの表面温度は50℃程度あるので、室温まで冷えて安定した状態でO.B.Dを測定した。要求公差50μmに対しばらつきは20μm以下で工程能力指数

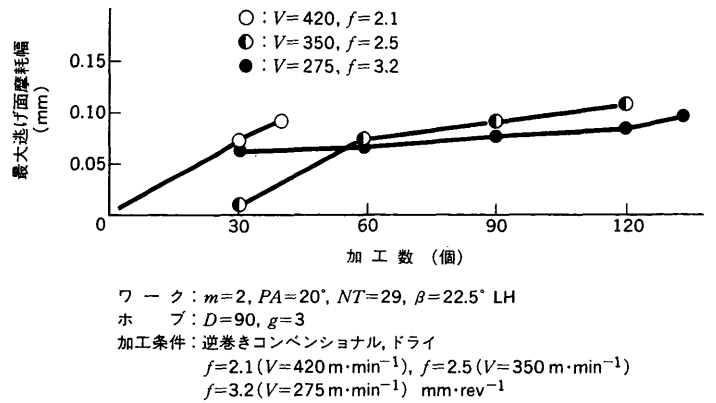


図7 切削条件の影響 切削速度を下げ、送りを上げた方が、摩耗が小さく熱亀裂も少ない。切削速度を下げ、熱の発生を抑えることが効果がある。
 Effect of cutting condition to flank wear

(Process Capacity Index : C_p 値) は目標1.33以上に対し2.12と良好な結果を得た。

6. ま と め

超硬ホブによる歯車の高能率加工の実用化のため、下記の取組みを行った。

- (1) 切りくず形状と逃げ面摩耗との相関を調べた結果、超硬ホブ切りでは切りくず長さを短くすれば、逃げ面摩耗が少なくなることが分かった。実際にヘリカルギヤ加工を行い、切りくず長さの短い逆巻きコンベンショナル加工が逃げ面摩耗が少ないことを確認した。
- (2) 超硬ホブ切り用に高速で剛性が高く、ギヤトレンに遊びのないホブ盤を開発した。また、本機の主軸には粘性を利用したイナーシャダンパを採用し、主軸の振動減衰特性を改善し、工具の耐チッピング性を向上させた。
- (3) 熱亀裂の防止、作業環境の改善を図るためドライカット法を採用した。また、本加工法に対応して、ベッド上面のフラッシングを採用した。

上記コンセプトに基づき開発した三菱NC超硬ホブ盤GS20 CNCを用いた加工試験により以下の結果を得た。

- (1) ドライカットで逆巻きコンベンショナル加工を採用しハイスホブの2倍の高能率加工を達成した。
- (2) このときの工具寿命は、ホブシフトなしでワーク切削長90mを加工し、摩耗0.15mm以下であった。
- (3) この間加工精度の変化は認められず、安定した精度を得ることができた。O.B.D変化も少なく C_p 値1.33を十分満足することを確認した。

以上の結果から歯切り加工の高能率化に、超硬ホブ切りが有効であることを実証することができた。

参 考 文 献

- (1) 桜木 功ほか, 超硬ホブ切りにおける工具損傷の基礎研究, 久留米工業高等専門学校紀要 Vol.9-2 (1994) p.1
- (2) 寺島健一ほか, ホブの歯みぞ切削状態の数値解析, 日本機械学会論文集 Vol.43-373 (1977)
- (3) 相浦正人ほか, 多条ホブによるはすば歯車のホブ切り法について, 日本機械学会論文集 Vol.830-5 (1983)