

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **13A1**
June/2007

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

切削による高精度歯車仕上げ加工
「切削によりどこまで仕上げ可能か」
High-precision Gear Finish-Cutting
"Potential of Finish-Cutting"

〈キーワード〉 歯車・ホブ切り・仕上げ加工・サーメットホブ・
cBNホブ・歯形精度・歯面粗さ

九州大学大学院工学研究院／ものづくりスーパー中核人材育成推進室
特任教授 有浦 泰常
Yasutsune Ariura



要 旨

歯車は、小型軽量化、低騒音低振動化等の要求から、その加工においてますます高精度が要求され、コストとバランスさせて製作することが求められている。また、歯面を滑らかに仕上げるために、高能率で最適な高精度仕上げ法が要求されている。砥石を用いた歯面研削やホーニング仕上げの適用がなされつつあるが、生産性の課題も多い。

生産性の点で優れた「ホブ切り」は、従来から動力伝達用歯車としてはそのまま使われることは少なく、通常さらに何らかの歯面仕上げ加工が行なわれている。

ここでは、生産性に優れたホブ切りを見直し、中硬度歯車のサーメットホブによる仕上げ、高硬度歯車の^{※1}cBN仕上げホブによる仕上げ、またドライホブ切りにおける歯面性状について考察し、切削による歯車仕上げの実用・普及のための方策を探る。

Abstract

A high precision in manufacturing of gears has been increasingly required because of the demand for small and lightweight gears with least sound and vibration while the manufacturing cost must be balanced with the requirement. A highly-efficient and optimum high-precision finishing method is required for the smooth finish of gears. Gear surface grinding with a grindstone and honing are being used for this purpose, but there is much challenge in terms of productivity.

A highly-efficient hobbing is reviewed here, and the cermet-tipped finish hob for the gears with medium hardness level and the cBN-tipped finish hob for the gears with high hardness level are described to seek and spread more practical method of gear finish-cutting. The gear surface characteristics of dry hobbing is also examined.

1. 歯車加工の高精度化

歯車伝動装置は、高信頼性・小型軽量化はもとより、低騒音低振動化・高機能化の要求とともに、ますますその歯車の加工において高精度が要求され、コストとバランスさせて製作することが要求されている。

高い負荷能力が要求され、限界に近い設計がなされてくると、曲げ強さに対してショットピーニングが必要となり、また、歯面強さにおいては歯面粗さが大きく影響するため¹⁾、精度の向上とともに歯面をいかにして滑らかに仕上げるかが重要となる。さらに、振動・騒音の低減に対しては、滑らかな回転を得るために、歯形修整・歯すじ修整を含めた最適な歯面形状が得られる適切な高精度仕上げ法が要求されている。近年、量産歯車も砥石を用いた歯面研削やホーニング仕上げの適用がなされつつあるが、生産性・コストの面から課題も多い。

「ホブ切り」は、生産性の点で優れた代表的な創成歯切り法であるが、従来から動力伝達用歯車としてはホブ切りのまま使われることは少なく、その後何らかの歯面仕上げ加工を行なうのが普通であった。本報は、生産性に優れたホブ切りを見直し、中～高硬度歯車に対して、切削による高精度歯車仕上げがどこまで可能かについて考え、その実用化・普及のための方策を探る。

2. ホブ切りによる高精度歯面仕上げ

ホブ切り歯車の精度および歯面粗さに及ぼす影響因子は、ホブ切り機構が複雑であることから、ホブ盤の特性・ホブの性能・切削条件など多岐にわたっている²⁾。最近、剛性の高いNCホブ盤の開発、ホブ製作精度の向上などによって、ホブ切りでも高精度歯車を得られるようになってきている。

図1は、比較的剛性の高いホブ盤を用いて歯切りを行なったときの測定歯形曲線とホブの誤差・ホブの取付け誤差を考慮した解析歯形曲線を示している³⁾。この図から、高剛性ホブ盤を用い、構成刃先^{※2}などを生じない条件でホブ切りを行えば、創成されるホブ切れ刃形状がそのまま転写されていることが分かる。一方、歯面粗さに関しては、切れ刃における構成刃先や付着物の生成の少ないホブ材質を選択することにより、研削並の粗さを得ることもできる。すなわち、高剛性ホブ盤、高精度ホブを用いることにより、ホブ切りにより十分高精度仕上げが可能である。以下、中～高硬度歯車のホブ切り仕上げについて具体的に示す。

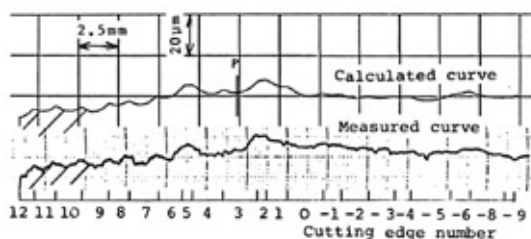


図1 ホブ切り歯車の解析歯形と測定歯形
平歯車:モジュール6, 歯数31
ホブ:外径115mm, 1条, 12溝

1) 中硬度歯車^{※3}/サーメットホブ切り仕上げ

図2は、中硬度歯車(合金鋼をHB300~350程度に調質したもの)をサーメット仕上げ専用ホブにより歯切りした場合の歯形・歯すじ形状を示したもので、歯車精度新JIS 3~4級を得た例である⁴⁾。中硬度程度までの歯車については、荒削りホブおよび仕上げサーメットホブを同一アークに取り付けてシフトを行なうことにより(図3)、荒削り・仕上げ削りを順次行ない、シェービングなどの仕上げを省くことができる。

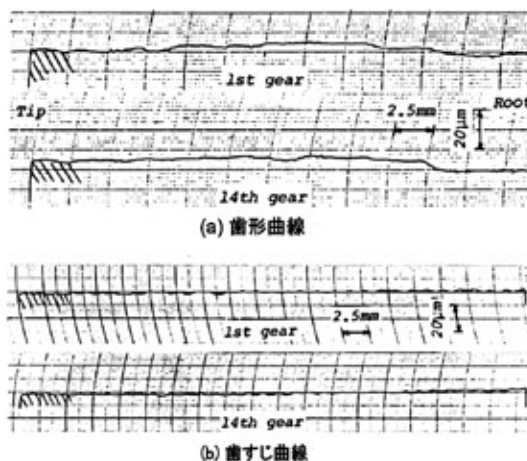


図2 サーメットホブにより仕上げられた歯車の歯形と歯すじの例
平歯車:モジュール6, 歯数31
ホブ:外径150mm, 1条, 18溝

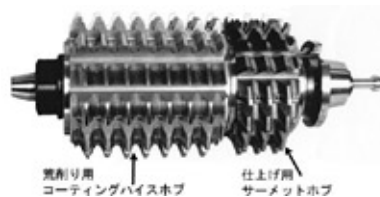


図3 荒削りホブと仕上げホブの同一ホブアーク取り付け

図4は、サーメットホブと超硬ホブにより仕上げられた歯面の電子顕微鏡写真である。超硬ホブにより仕上げられた歯面には切削筋とともに切りくずの逃げ面付着⁵⁾による傷が見られる。一方、サーメットホブにより仕上げられた歯面には細かなピッチで切削筋が見られ、構成刃先や付着物による切削筋の乱れやむしれは見られず、ホブ切れ刃形状が転写され、滑らかな歯面となっている。これは、サーメットの耐摩耗

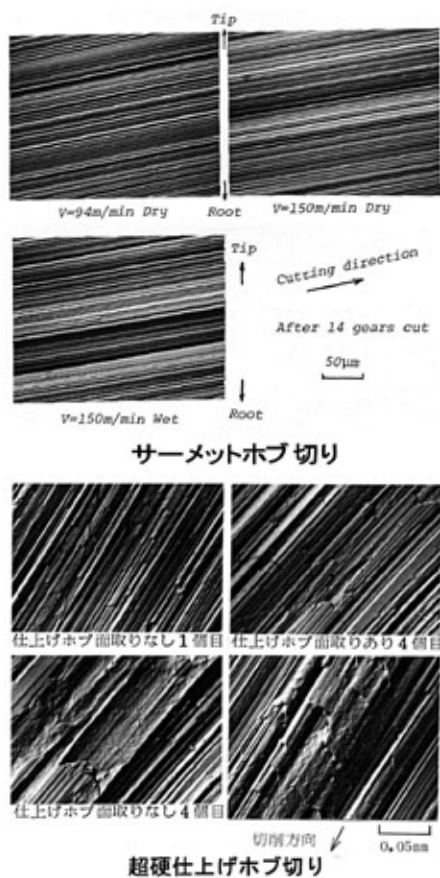


図4 サーマットホブと超硬ホブにより仕上げられた歯面の電子顕微鏡写真

性が超硬に比べて優れていること、サーメットの鋼に対する親和性が低いために切りくずが切れ刃に付着しないことにより切れ刃と歯面間へのかみ込みに起因するチッピングも生じていないためである⁶⁾。

図5は、サーメットホブおよび超硬ホブ (M10) による歯面仕上げ後の歯面粗さの切削回数に対する変化を示している。サーメットホブは切削回数が増えても粗さは小さく、超硬ホブと比べて粗さのばらつきも小さい。切削速度を150m/minに増すと粗さのばらつきはさらに小さくなり、最大粗さRz 2µm程度になっている。これは研削仕上げの歯面粗さに匹敵する滑らかさである。

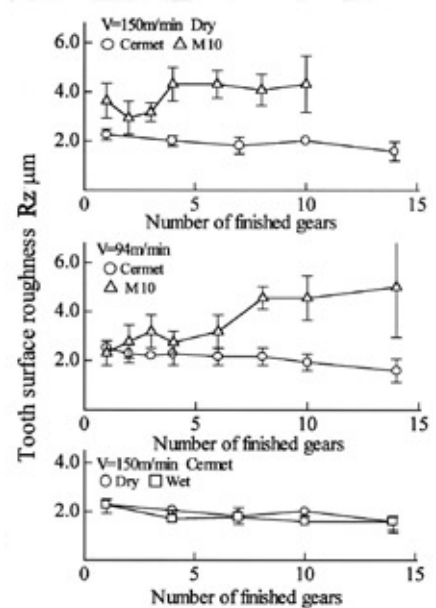


図5 サーマットホブと超硬ホブにより仕上げられた歯面の粗さ
平歯車:モジュール6, 歯数31, 歯幅50mm
ホブ:外径150mm, 1条, 18溝

2) 高硬度歯車/cBNホブ切り仕上げ

高硬度歯車(浸炭焼入れなど)においては、熱処理ひずみ除去のため、何らかの歯面仕上げを行なう必要がある。ここでは、高硬度歯車の歯面を能率良く加工できるcBN材をホブ切れ刃として用いた仕上げホブを試作し、歯切りした結果⁷⁾から高硬度歯車の仕上げの可能性について述べる。

試作した仕上げ専用cBNホブは、ホブ切れ刃部分の超硬基台上にcBNチップを貼付け、さらにホブ本体にろう付けしたものである(図6)。なお、切れ刃先のホーニングを行ない逃げ面側30~50 μ mの面取りを施している。HRC60に浸炭焼入れした合金鋼歯車の片歯面を切込み約0.1mmで切削を行なった。切削速度150~900m/minでの摩耗の進行は小さく、耐摩耗性に優れている。このことは仕上げ切削工具としては重要である。また、切削速度900m/minの条件は、ホブ切りとしてはこれまでに例のない高速であり、cBNを使うことによりこのような切削条件が可能である(図7)。

cBNホブ切れ刃の研削時に生じたチッピングが刃先のホーニング後も残っており、仕上げ面性状を悪化させるため、ホブの研削時の欠けに注意する必要がある、ホブの製作技術の進展が望まれる。本試験で行なった切削速度域ではいずれも切削不能状態になることはなく、摩耗の進行も小さいことから安

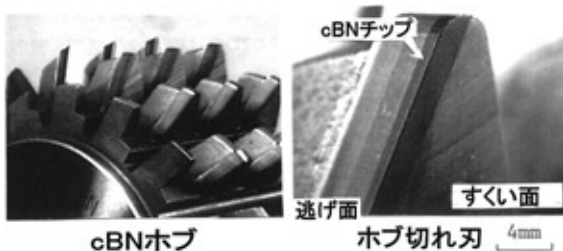


図6 cBN仕上げホブ
モジュール6,外径150mm, 1条,18溝

定した滑らかな歯面(Rz1.0~2.4 μ m)が得られ、高硬度歯車のcBNホブによる高速度の仕上げ加工が可能であると考えられる。

図8は、切削速度900m/minの20回切削後の歯車歯形を示しており、ホブの歯形誤差、ピッチ誤差およびホブ取り付け偏心誤差を考慮した解析歯形³⁾も併記している。歯形形状は良く一致しており、特に切削速度が速くなっても歯形形状への影響は小さく、ホブ切れ刃の精度によって仕上げ歯車の歯形精度は決まることを表している。



図7 cBNホブによる仕上げ切削の様子
平歯車:モジュール6, 歯数31,歯幅50mm
ホブ:外径150mm, 1条, 18溝
切削速度900m/min

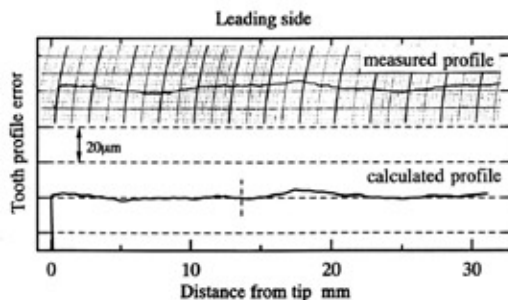


図8 cBN仕上げホブにより仕上げられた20個目の歯車の解析歯形と測定歯形
平歯車:モジュール6, 歯数31
ホブ:外径150mm, 1条, 18溝
切削速度900m/min

3. ドライ歯切りにおける歯面性状

1) ドライ歯切り

環境問題に対する認識の高まりから切削油を減らすかあるいは全く切削油を使わない加工が求められている。一方では、このことは、切削油・給油装置・廃油処理などに必要な経費の削減が見込まれ、生産コスト低減につながる。

※4
近年、高速度鋼にTiAlNコーティングを施したホブにより切削油を用いないで切削速度200m/minの切削が可能であることが示され、小モジュールの歯車への適用が広く進められてきている。国内においても、超硬ホブによるドライ歯切りが実用化されている例もあり、また硬く焼入れされた軸付き歯車を超硬ホブでドライ・むく切りする使用例もある。

図9は、すくい面コーティングなし(逃げ面はTiAlNコート)の高速度鋼ホブで切削速度150m/min、送り2mm/revでドライ加工した仕上げ歯面の損傷例⁸⁾である。切りくずがかみ込まれ圧着や溶着したものである。この他にも高速・高温で飛散する切りくずが原因と考えられるホブの損傷や歯面の傷などの不具合も現れることがあり、歯面仕上げにおいてはドライ化に当たってこれらの問題を解決しなければならない。

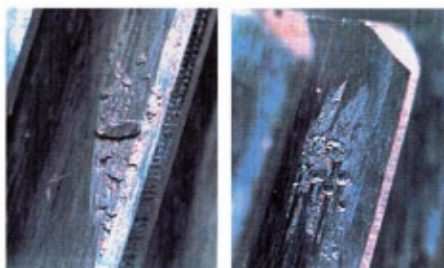


図9 ホブ切りによる歯面の傷
はすば歯車:モジュール1.3, 歯数34,
ねじれ角20.6°
ホブ:3条, 14溝, TiAlNコーティング
(すくい面コーティングなし)
切削速度150m/min, 送り2.0mm/rev, ドライ

2) ドライ歯切りにおける 切りくず生成・飛散挙動の観察

切りくず生成と切削後の切りくずの挙動について高速度ビデオカメラを用いて観察を行なった⁹⁾。サーメットホブによる中硬度歯車の仕上げ切りにおいては、薄くて短い切りくずが生じ、前述の通り、生成中の切りくずは仕上げ歯面に損傷を与えることなく、滑らかに排出されており、またサーメット切れ刃には溶着物などの付着は見られず良好な歯面が得られている。

さらに、切りくずの生成状態を詳細に知るため、ホブ盤により、ホブの1刃と同じ形状の1本刃の舞いツールと1歯みぞ分の形状の被削材を用いて切削始めから切削後の切りくず飛散状態を高速度ビデオカメラで観察した。

(高速度ビデオカメラによる切りくずの生成と飛散)

図10は、切れ刃が1歯みぞの中を切削する状態を示している。平歯車の1条ホブ切りにおいてホブ切れ刃の特定の位置に相当する切削である。切削前にすでに2つの切りくずが切れ刃に付着しており、新しく生成され始めた切りくずが付着した切りくずを押し出しながら成長し、切削直後に2つの付着切りくずのうち古い切りくず(一番上に付着していた切りくず)だけが飛散している。

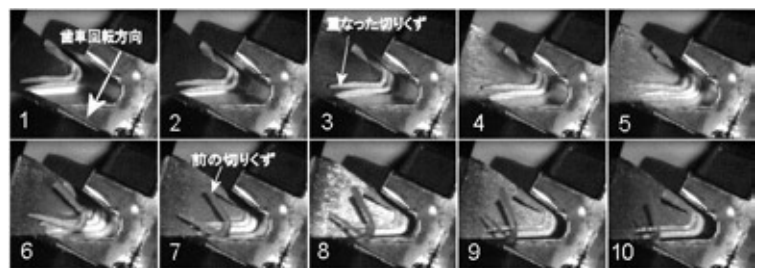


図10 ホブ1刃に相当する1本刃舞いツールを用いた
ホブ盤による歯切り
想定平歯車:モジュール3, 歯数42,
想定ホブ:1条, 12溝
切削速度80m/min, 送り1.5mm/rev.,
ドライ, 2000フレーム/s

この例のようにすくい面がコーティングされていない高速鋼切れ刃の場合、切りくずの付着が多く、切れ刃に付着したまま次の切削を行なうことがある。

(すくい面コーティングの効果)

すくい面コーティングが施された高速鋼切れ刃の例では、切削後の切りくずが切れ刃に付着する割合が少ない。図11は、TiAlNコート切れ刃によるはずば歯車の切削例であり、切りくずのみを1画面に合成して示している。図11(a)は生成された切りくずが切削終了直後に今まで切削していた右側切れ刃から左側切れ刃側へ流出し、歯面に衝突して逆側へ飛散する様子を示し、図11(b)は、(a)の場合と同様に歯面に衝突後そのまま同歯面側へ飛散する様子を示している。

歯面を傷つけると思われる切りくず挙動はすべての切れ刃において観察されるのではなく、特定の数刃のみに現れている。切削直後の切りくずは、切れ刃の切削終了位置に影響を受け、切削終了点で回転しながら飛散する機会が多い。ホブ切れ刃は3つの切れ刃(左右側面切れ刃、外周部切れ刃)が存在するが、片側の切れ刃のみあるいは外周部と片側切れ刃による切削の場合で長く切削をする切れ刃では、図11に示すように切削部の反対側へ切りくずが流れると歯面と切れ刃の間にかみ込まれる現象が生じると考えられる。すくい面にコーティングを施すことにより、切りくずは切れ刃に付着しにくい、切りくずの飛散方向の制御が重要となる。とくに仕上げ歯面に傷などが現れた場合、切削状態を調べ、かみ込みの可能性を減らすために切削条件を検討する必要がある。

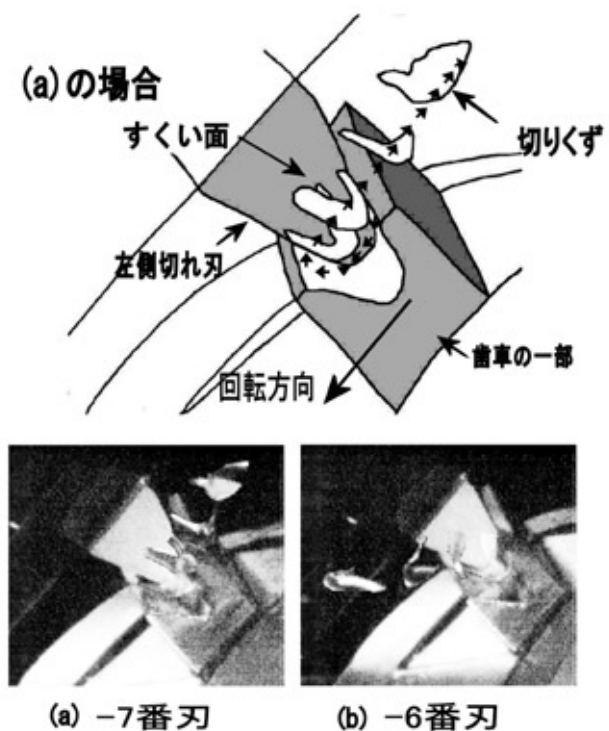


図11 ホブ1刃に相当する1本刃舞いツールを用いたホブ盤による歯切り
 想定はずば歯車:モジュール3, 歯数39,ねじれ角20°(左)
 想定ホブ:3条(右), 12溝
 切削速度80m/min, 送り1.5mm/rev.,
 ドライ, 2000フレーム/s

4. 高精度化と高能率化の実現に向けて

歯車装置の性能の点から、以前にも増して歯車の高精度化が求められている。低・中硬度の歯車に対しては、サーメットホブの開発により高品質の歯面が切削で得られるようになった。高硬度歯車に対してもcBNホブにより仕上げ切削が可能になればさらに高能率な生産が期待できる。

ドライカットにおいては切りくず生成・飛散挙動が仕上げ面精度や切れ刃の損傷に関係することが明らかになってきており、この問題を解明し、対策を立てることが必要である。

ここで述べた切削による高精度歯車仕上げは必ずしも歯車対の両方に適用することではなく、ホブ切りの特性、ホブの製作精度、加工時間を考慮して、例えば、大歯車に対してホブ切りを適用し、小歯車は歯面修整を施しやすい歯面研削などにより要求される歯面形状に仕上げ、歯車対として適切な精度・コストを実現するような方策も考えるべきである。

高能率・高剛性加工機械、高精度・高性能工具などが改良・進展が期待される中、ホブ切りのような複雑な加工においても、加工能率の良い切削を今一度見直す価値が十分あると思われる。

用語解説

※1 cBN(立方晶窒化ほう素)

立方晶窒化ほう素は、高圧合成ダイヤモンドと同じように、超高压・高温下で合成した硬質材。ダイヤモンドに次ぐ硬さを持っている。研削砥粒として、また粉末を焼結して切削工具材料として用いられる。高温硬さが高く、鉄系材料との反応性が小さいため、焼入れ鋼などの切削に適している。

※2 構成刃先

鋼など低速で切削する時、切りくずの一部が大きく変形を受け加工硬化して、切れ刃に付着したもの。切れ刃の一部となって切削に関与するが、成長・脱落を繰り返すことから、切削面を悪化させることが多い。

※3 サーメット

サーメット(Cermet)は、セラミックス(Ceramics)と金属(Metal)からの合成語。一般には、炭化チタン(TiC)にタンタル、ニオブ、タングステンなどの炭化物を加え、ニッケルやコバルトを結合材として焼結したもの。

※4 TiAlN

チタンとアルミニウムと窒素の化合物で高硬度。工具表面にコーティングすることで工具摩耗を押さえ、寿命を長くすることができる。

参考文献

- 1) 有浦・中西・上野、機械の研究、37-11(1985-11)1208.
- 2) 有浦・梅崎、トライボロジスト、50-3(2005-3)196.
- 3) 有浦・丘・梅崎、日本機械学会論文集、52-480、C(1986-8)2160および2167.
- 4) 有浦・梅崎ほか、日本機械学会論文集、57-544、C(1991-12)3964.
- 5) 有浦・梅崎ほか、日本機械学会論文集、54-499、C(1988-3)673.
- 6) 梅崎・有浦・奈良、日本機械学会論文集、55-509、C(1989-1)158.
- 7) 有浦・梅崎、機械の研究、49-4(1997)458
- 8) (社)日本歯車工業会、環境対応型歯車加工技術の開発に関する調査研究「ホブによるドライカット」調査研究報告書、(2000)39.
- 9) 梅崎・有浦ほか、日本機械学会論文集、69-678、C(2003-2)516および524.