

研究ノート

CNCホブ盤の消費動力に関する研究

近江八幡総合高等職業訓練校 大坪 武廣

Study on the Consumption of Power in CNC Hobbing Machines

Takehiro Ohtsubo

要 約 CNCホブ盤のホブ切りにおける消費動力の大きさやその変動特性を知ることは、CNCホブ盤の設計及び最適ホブ切り条件の決定などに非常に有効である。しかしCNCホブ盤の消費動力の大きさや、ホブ切り切削条件の影響などについて従来の研究は少ない。

本研究は、CNCホブ盤の消費動力に関して、(1)切削動力の大きさを計算できる計算式の作成、(2)ホブ切り切削条件の違いと消費動力の変動、(3)ホブ切り消費動力のチェック方法などについて研究を行い、ホブ盤設計、ホブ盤加工作業の能率向上に役立つ結論を得たので、その成果を報告する。

I はじめに

CNCホブ盤は、ホブと歯車材の相対運動によって歯車の歯形を創成する歯車加工機械である。精度の良い歯車を高効率で加工できるので、歯車加工機械の中で最も多く用いられている。この研究は、CNCホブ盤のホブ切りにおける消費動力に関するものである。

CNCホブ盤のホブ切りにおける消費動力の大きさやその変動特性を知ることは、CNCホブ盤の設計及び最適ホブ切り条件の決定などに非常に有効である。しかしCNCホブ盤の消費動力の大きさや、ホブ切り切削条件の影響について、従来の研究は少ない⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

本研究は、CNCホブ盤の消費動力に関して、(1)切削動力の大きさを計算できる計算式の作成、(2)ホブ切り切削条件の違いと消費動力の変動、(3)ホブ切り消費動力のチェック方法などについて研究を行い、ホブ盤設計、ホブ盤加工作業の能率向上等に役立つため、その成果を報告する。

II ホブ切り切削動力の計算式の作成

1 ホブ盤構造と消費動力、切削動力の関係

切削動力の計算式作成に当たって、ホブ盤構造と消費動力及び切削動力の関係について考察する。

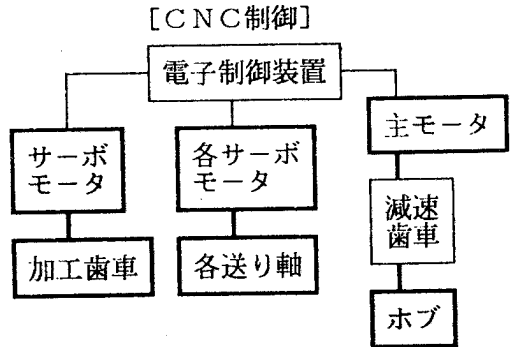


図1 CNCホブ盤の構成

図1に示すように、CNCホブ盤では独立した各軸のモータが電氣的に連結されている。即ち、歯車創成切削運動を独立した主軸用ACスピンドルモータで行い、他の各軸は、ACサーボモータで駆動する。主軸用ACスピンドルモータの消費動力の関係式を次に示す。

$$W_{nc} = (W_o + W_c) \quad [kw] \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中 W_o = ホブ軸空転動力、 W_c = 切削動力

次に、図2に示すホブ軸駆動方式の違いは、減速歯車の有無にある。ホブ軸直接駆動方式では、主軸モータがホブ軸台上に設置され、主軸モータからホブ軸の間には実質上減速歯車がなく(タイミング用歯車の付属例有り)、その分の機械効率低下はない。主軸モータの使用条件から考察すると、ホブ軸直接駆動CNCホブ盤の方が、機械

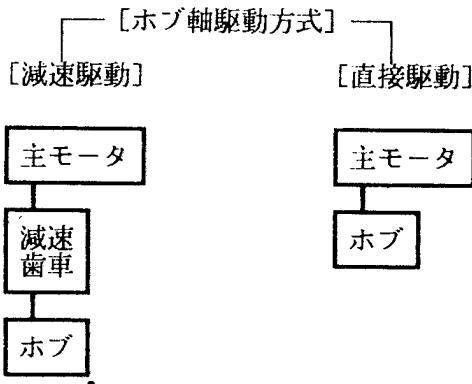
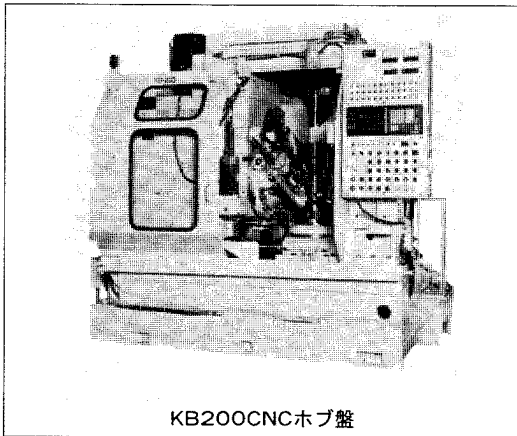


図2 ホブ軸駆動方式

効率が良い分だけ損失動力が少ないため、消費動力は相対的に小さい。

切削動力 W_c の大きさは、使用するホブ、ホブ盤、加工歯車及び切削条件などによって異なる。切削動力の大きさを、比較的容易に計算できる計算式があれば、ホブ盤設計とホブ盤加工作業の能率向上等に役立つと思われるので、次の第2項で、計算式の作成結果を提示する。



KB200CNCホブ盤

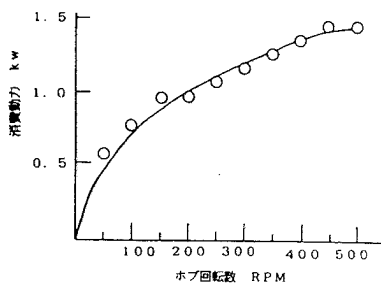


図3 ホブ軸空転駆動動力 W_0
(KB200CNCホブ盤)

CNCホブ盤のホブ駆動空転動力(式(1)の W_0)は、ホブ盤構造とホブ回転数によって異なる。図3に、次の仕様のホブ盤に対して、ホブ空転駆動動力 W_0 を調査したので、その実験結果を示す。図3には、使用したKB200型CNCホブ盤の外観写真も併載しておく。

カシフジ製KB200CNCホブ盤仕様：

- ①ホブ軸直接駆動型、②主軸モータ：ACスピンドルモータ11/15KW、③ホブ回転数50～500RPM、④最大切削歯車径220mm、⑤最大切削モジュール7、⑥機械総重量9tonf、⑦JIS B 6216 静的精度検査合格、試験歯車加工精度 JIS 0級。

2 ホブ切り切削動力計算式の作成

著者の提案する計算方法は、具体的な切削諸元と材料定数としての単位切削動力値から計算する方法である。実測切削トルクから求めた単位切削動力値を使えば、簡単な計算式であっても実測値に近い値を得ることが出来ると思われるので、以下に作成した計算式を提示する。ホブ盤の主軸駆動モータからのトルク M は、 M_0 だけの動力をホブ軸に与え、角速度 ω でホブ軸を回転駆動させる。このときの切削動力 W_c は、次式で表される。

$$W_c = M\omega = M \cdot 2\pi n_h / (60 \times 10^3) \text{ [kw]} \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中 M =トルクKgf・mm、 n_h =ホブ回転数RPM
切削動力 W_c は、単位時間当りの切削量 V と単位切削動力値 Q_i からも計算できる。この計算式を導いてみる。

まず、歯直歯角みぞ面積 S を有するはずば歯車のホブ切りされる全歯みぞ容積を求める。

$$V_0 = S \cdot Z \cdot B \cdot \cos\beta \text{ [mm}^3\text{]} \quad \dots\dots\dots(3)$$

歯幅 B の歯車の正味切削時間の計算式

$$t = Z \cdot B / (f \cdot n_h \cdot g) \text{ [min]} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(3)、(4)から毎分当りのホブ切り切削量を求める。

$$V = V_0 / t = S \cdot f \cdot n_h \cdot g / \cos\beta \text{ [mm}^3\text{/min]} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ゆえに切削動力の計算式は次式で表される。

$$W_c = V / Q_i = S \cdot f \cdot n_h \cdot g / (Q_i \cdot \cos\beta) \text{ [kw]} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中 S =歯みぞ面積 mm^2 、 Z =歯数、 B =歯幅 mm 、 β =ネジレ角度、 f =送り mm/rev. 、 g =ホブ条数、 Q_i =単位切削動力値 $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} / \text{kw}$

式(6)中の歯みぞ面積 S 、単位切削動力値 Q_i については、付録に参考資料を示しておく⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

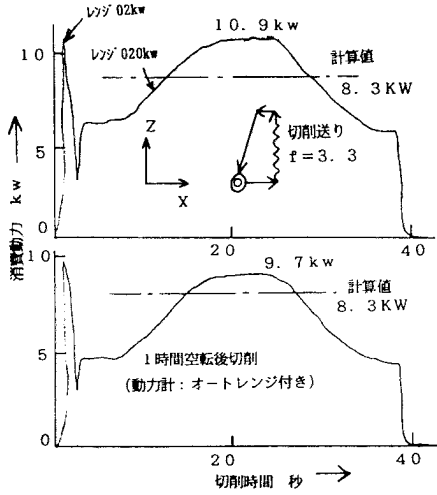


図4 主軸モータ消費動力実測例

表1 実験条件

歯車	ホブ	切削条件
モジュール：2 歯数：80 ネジレ角：右30度 材質：SCM415 硬度：HB180 圧力角：17.5度	直径：100 条数：右4	ホブ回転数：370RPM 切削送り：3.3mm/rev. クライムカット CNCホブ盤 カシフジ製KB200CNC ACスピンドルモーターII 15kW ホブ直接駆動型

計算式(6)の実用性を調べるため、表1の実験条件で実験を行った。その結果を図4に示す。CNCホブ盤の主軸駆動モータ消費動力測定は、ACスピンドルモータの動力計表示用電圧信号とレコーダを接続して行った。図4の実測例は、切削動力 W_c とホブ駆動空転動力(式(1)の W_0)を含み、当然計算値の切削動力 W_c より大きい。表1から計算した切削動力 W_c 値と、図3のホブ駆動空転動力 W_0 を加算すると、実測最大値と10%以下の相違であり、表1の実験では、計算式(6)の実用が可能と考察されるが、今後、他の実験条件で実用性をさらに確認する必要がある。図4に、1時間空転後の消費動力実測値も示したが、1時間の空転によって、消費動力が10%程減少した。回転部温度上昇による摩擦低下が原因と思われるが、詳細

は検討課題とする。

図4に示すように、切削送り量を定速にすると、消費動力は1山を描いた。CNCホブ盤では任意の切削送りが設定できるので、次のIII節で任意の切削送り時の消費動力変化について検討する。

III 切削条件の変化と消費動力の関係の実験方法、結果及び考察

切削条件を変化させた場合の消費動力の変動特性について調査するため、数種の実験を行った。その方法、結果及び考察を以下に報告する。

表2 実験条件

歯車	ホブ	切削条件
モジュール：2.25 歯数：40 ネジレ角：左30度 材質：Scr20 硬度：HB160 圧力角：20度 歯幅：30mm	直径：95 条数：右3 刃溝数：12	ホブ回転数：400RPM 切削送り：図6参照 CNCホブ盤 カシフジ製KB200CNC ACスピンドルモーターII 15kW ホブ直接駆動型 オートレンジ付動力計使用

実験方法としては、表2の実験条件にて、5種の切削パターンを計画し、CNCホブ盤を用いて切削実験を行い、消費動力変動特性を調査した。主軸モータ消費動力の測定は、ACスピンドルモータの動力計表示用電圧信号とレコーダを接続して行った。使用したCNCホブ盤のホブと加工歯車の相対位置を示した座標系を図5に示す。

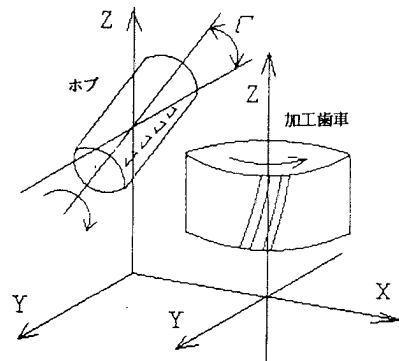


図5 CNCホブ盤の座標系

図5で、X軸が切り込み深さ方向、Z軸が歯幅に対する切削送り方向を示す。5種の切削パターン例と、それに対する主軸モータ消費動力測定値、切削時間測定結果を図6に示す。

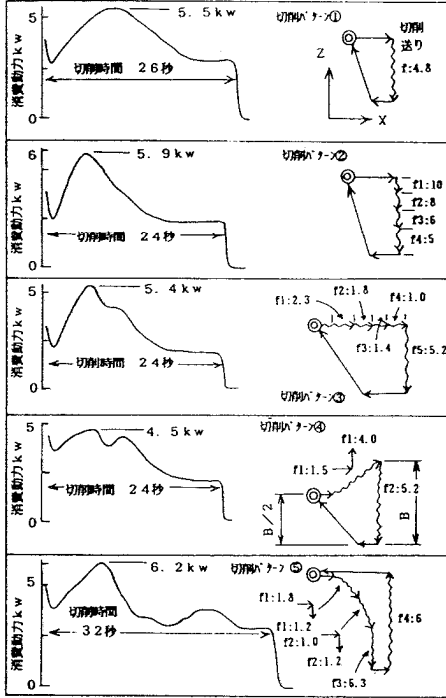


図6 5種の切削パターンと消費動力

図6の測定結果を見ると、切削条件の変化、即ち、切削パターン①～⑤に対応して、消費動力パターンは、1山から2山へ変動している。

切削パターンの詳細を次に述べる。

図6のパターン①は、歯幅方向Z軸切削送り量が定速である。パターン②は、Z軸切削送り量を変速させた。パターン③は、切込み方向X軸切削送り量を変速させ、Z軸方向送りは一一定とした。パターン④は、Z軸、X軸切削送りを同時移動制御し、その後Z軸方向切削送りを一定にした。パターン⑤は、2回切り切削サイクルに類似させたため、切削時間も長く、消費動力パターンも2山を描いた。

切削パターン②、③、④は、切削時間が同じ(24秒)になるように、各切削送り量を設定した。消費動力パターンが2山を描いた④では、②、③と切削時間は同じであるが、消費動力のピーク値が一番低かった。この理由としては、切削送り量を変速させたことによる切削量の分散効果によると考察される。この効果の切削理論につい

ては今後の研究課題としたい。

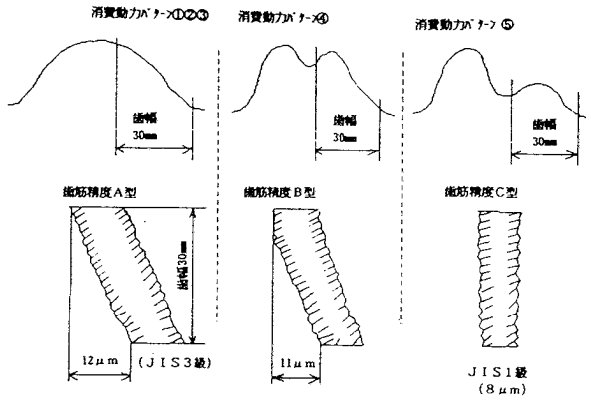


図7 消費動力パターン(切削パターン)と歯すじ精度

図7は、図6の切削パターン①～⑤に於ける、歯筋方向切削精度の比較を行ったものである。歯筋精度は、A、B、Cの3種に分類でき、⑤のC形がJIS 1級で一番良かった。⑤の消費動力パターンは2山であり、2回切り効果によって歯筋精度が相対的に良好であったと考察する。

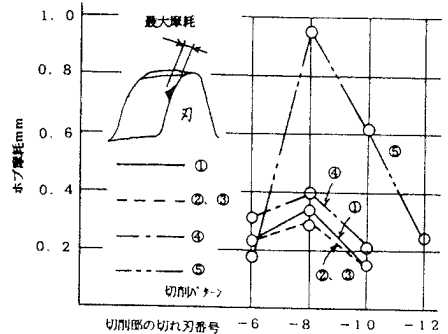


図8 切削パターン①～⑤とホブ摩耗

図8は、図6の切削パターン①～⑤と、ホブ摩耗の関係調査結果で、各切削パターン毎にホブシフト無し(即ち同じホブ切れ刃で)にて、100個(切削長93m)の歯車をホブ切りした結果を示す。①～③の1山パターンの方が摩耗は少なかった。図8中のホブ切れ刃番号は、ホブの作用切れ刃中央からの番号で、「-」付きは切削遠のき側を示す。

図9は、図8のホブ摩耗原因を調べるための切削領域を示す。図9からわかるように、切削パターン④、⑤の切削期間が①～③より相対的に長い。加えて、切削パターン⑤では、切込みパターンが、クライムカット切削時(送

表3 実験結果

動力パターン	1山	2山
精度	×	④⑤
ホブ摩耗	①②③	×
切削能率	①②③	④
消費動力	×	④

及び消費動力の軽減に利用できると考えられる。切削動力は、式(2)に示すように、力と速度の積であるから、その合成値として測定結果に現れてくると考察される。但し、切削精度には諸々の原因が荷担するので、その解析は複雑であり、消費動力の特性による歯切り精度の判定の実用性については、今後検討を要する。

IV ホブ切り消費動力の簡易チェック方法

前III節で述べたように、切削条件を変化させると、消費動力も追隨して変動した。ホブ盤に、インプロセス計測用の消費動力測定器を設置しておく、消費動力が監視でき、切削条件の可否が判定可能である。しかし、動力測定器が無い場合、また有っても最初の条件設定は困難なことが多い。

本節では、ホブ盤加工作業の能率向上のため、切削条件の選定を容易にする消費動力の簡易なチェック方法を提示する。

切削条件の選定に当たり、基準となる計算式は、II節で作成した計算式(6)である。計算式(6)中、切削条件に該当するのは、ホブ回転数 n_n 、切削送り量 f の2つである。他の計算要素は、歯車、ホブデータ及び単位切削動力値から必要数値を得ることが出来る。切込み量の変化に対しては、歯みぞ面積と単位切削動力値を変更しなければならない(単位切削動力値が付図1と異なる)。

なお、ホブ回転数 n_n と切削送り量 f は、次の理由から設定値がさらに制限される。

- ホブ回転数 n_n
 - ホブ寿命
 - ホブ盤仕様
- 切削送り量 f
 - ホブ盤仕様
 - 歯面粗さ
 - ホブ寿命

切削条件 n_n 、 f の組合せは無数にあり、選定指針としては次の要素が挙げられる。

- ホブ回転数 n_n
 - ホブの材質 — 付録資料参照
 - 歯車材の材質 — 付図3⁽⁶⁾⁽⁷⁾
 - 生産量(式(4)(5)等利用)⁽⁷⁾

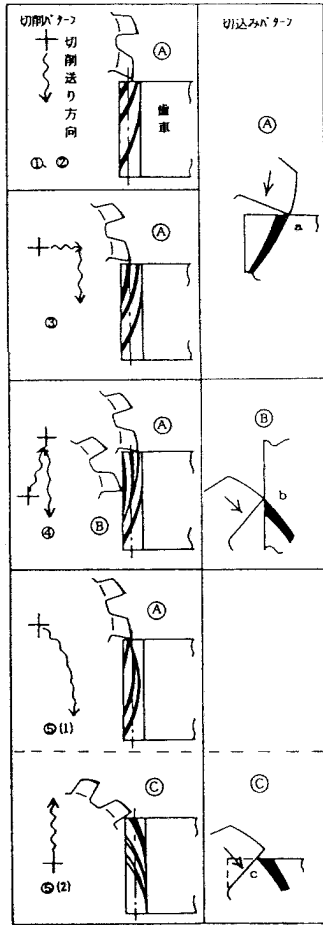


図9 切削パターン①～⑤と切込みパターンA～C及びその切削領域

り方向がZ軸プラス方向)に、切込みパターンCの様に、ホブ切れ刃の少し下側から切り込んでいる。この切削状況は、①～④と全く異なる。図8に示す切削パターン⑤のホブ摩耗悪化原因はこの辺にあると考えられる。

図6～図8の実験結果を整理すると、表3のようになった。表3の結果からわかるように、歯切り精度を良くしたり消費動力を少なくしたいときは、消費動力パターンとして2山を描くように切削条件を設定すると比較的に良い結果が得られた。ホブ寿命を延ばしたいときは、1山の動力パターンを描くように条件設定すると良い結果が得られる事がわかった。

以上の実験結果から、消費動力パターンを測定することによって、歯筋方向切削精度の改善、ホブ摩耗の減少

切削送り量 f ———— 生産量 (式(4)(5)等利用)
 ———— 歯面粗さ (付録資料参照) (7)

切削条件 n_m, f の選定は、付録の参考資料を参照して行い、切削動力計算式(6)を用いて計算を実施し、主軸モータの定格動力値を越えないように設定していく。なお、選定したホブ盤において、生産量を満足させられない場合は、同じホブ盤の台数を増やすか、1ランク上のホブ盤を選定することになる。生産量の不足が少しの場合は、主軸モータの馬力アップも考えられる。

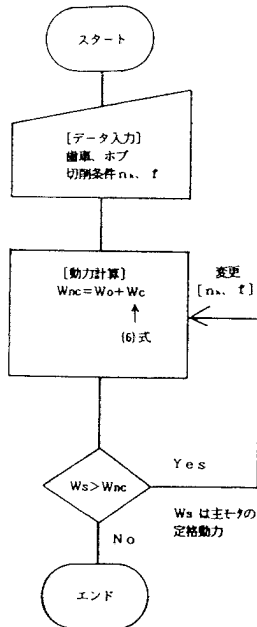


図10 CNCホブ盤の動力チェックプログラム

図10には、動力チェックプログラムチャートの一例を示す。CNCホブ盤にこのプログラムを組み込んでおくと、切削以前に消費動力をチェックすることも可能になる。

V 結論

ホブ盤の消費動力の大きさやその変動特性を知ること、CNCホブ盤の設計及び最適ホブ切り条件の決定などに非常に有効である。本研究の成果を次にまとめてみる。

(1)具体的な切削諸元と材料定数としての単位切削動力値から計算する切削動力計算式を作成した。CNCホブ盤での実験例との比較では、計算値は実測値と10%以下の相違であり、今後実用化に向けてさらに研究を進めていきたい。

(2)切削条件を変化させたときの消費動力の変動特性を調

査した。消費動力をインプロセスで計測することによって、切削精度の改善、ホブ摩耗の減少及び消費動力の軽減に利用できる可能性が得られた。但し、消費動力の変動特性による歯切り精度などの判定の実用性については今後さらに検討を要する。

(3)作成した切削動力計算式を利用して、ホブ切り消費動力のチェックプログラムチャートを作成した。消費動力が切削以前にチェックできる可能性を提示した。

(4)本報の消費動力の研究手法は、他の工作機械にも適用可能で、今後の研究課題としたい。

VI 謝辞

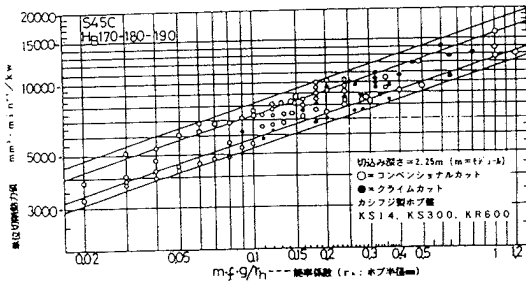
株式会社カシフジには、CNCホブ盤、実験機器とその計測にご協力いただいた。謝意を表する。さらに、本稿をまとめるに当たり、ご支援をいただいた京都技能開発センター中野幸二所長に感謝の意を表する。

VII 文献

- (1)D, A, MILER et al : INT. J. PROD. RES., Vol14, No.5 (1976)
- (2)大坪：設計工学会講演論文集（関西）、昭59年11月
- (3)大坪：機械の研究、1987年3月号、p387
- (4)大坪：機械学会論文集C55巻511号、1989年3月、p818
- (5)大坪：機械学会論文集C55巻511号、1989年3月、p820
- (6)H, Pfauter : PFAUTER-WAELZFRÄZEN, Springer-Verlag
- (7)和栗他：歯車便覧、日刊工業新聞社、昭和44年、p667

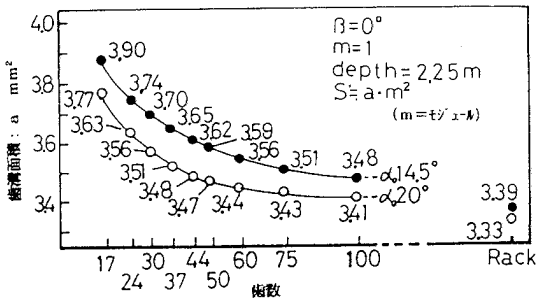
VIII 付録 (参考資料)

1. 計算式(6)に必要なデータの中で、単位切削動力値 Q_i と歯みぞ面積 S を、それぞれ付図1、付図2に示す。付図1の単位切削動力値 Q_i は、並歯のインボリュート歯車、



付図1 単位切削動力値

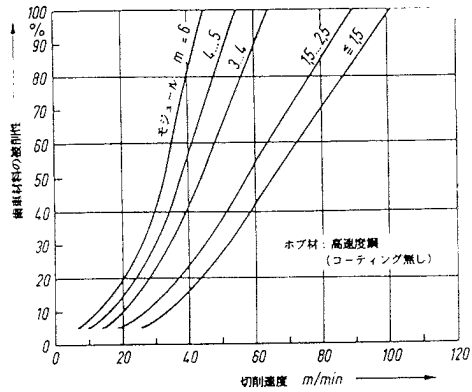
標準刃形ホブ及び生産型ホブ盤に対して、実測最大切削トルクから求めた。90種の実験値から採集した。



付図2 モジュール1の歯直角歯みぞ面積 a
(任意モジュールの面積 $S \approx a \cdot m^2$)

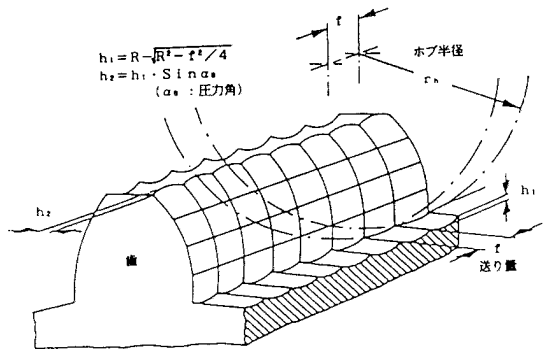
付図2の歯みぞ面積 a の詳細な計算式については、すでに公表した文献(4)を参照してほしい。付図2の歯みぞ面積 a は、モジュール1に対する値で、他の任意モジュール m に対する歯みぞ面積 S は、次式から計算して求める。

$$S \approx a \cdot m^2 \text{ [mm}^2\text{]}$$



付図3 切削速度の選定図

2. ホブ回転数は、付図3を参照して選定する。切削送り量の選定容易化のための歯面粗さの高さは、付図4の計算式から計算する。付表1には、切削送り量の選定参考値を示しておく。



付図4 歯面あらし h_1 、 h_2 の求め方

付表1 切削送り量の選定参考値 (著者採集成成)

加工、ホブの種類	送り量 f mm/テーブル回転
ホブ切り仕上げ	$f = (0.8 \sim 2) \cdot \cos \beta$
シェービングの前加工	$f = (2.5 \sim 6) \cdot \cos \beta$
歯車研削の前加工	$f = (2.5 \sim 8) \cdot \cos \beta$
2条ホブ使用	$f_2 \approx 2/3 \cdot f$
3条ホブ使用	$f_3 \approx 1/2 \cdot f$