超高速高出力カム研削盤の開発 (第1報)*

—— チルド鋳鉄の超高速研削特性 ——

和久田 学** 太田 稔** 上田啓雄*** 宮原克敏**

Development of Ultrahigh Speed and High Power Cam Grinding Machine (1st Report)

— Characteristics of Ultrahigh Speed Grinding of Chilled Casting —

Manabu WAKUDA, Minoru OTA, Hiroo UEDA and Katsutoshi MIYAHARA

High speed grinding has long been considered one of the most effective methods for improving productivity of manufacturing lines. This study applies ultrahigh speed CBN grinding technology to develop a cam profile grinding machine capable of dramatically exceeding the machining efficiency of conventional cam grinders. This paper evaluates the characteristics of a chilled casting ground in experiments carried out with an ultrahigh speed surface grinding machine allowing operation at a wheel peripheral speed up to 200 m/s. An equation expressing the relationship between grinding force and grinding conditions: wheel peripheral speed, wheel depth of cut, and grinding wheel diameter, was developed. In addition, grinding power consumption was demonstrated to be independent of wheel peripheral speed, and to be defined only by grinding stock removal rate. Furthermore, the increase in wheel peripheral speed from 80 m/s to 200 m/s, both doubled grinding efficiency and decreased both the grinding force required and wear of the grinding wheel.

Key words: cam grinding machine, ultrahigh speed grinding, surface grinding, grinding force, grinding power, grinding efficiency, vitreous CBN wheel, chilled casting

1. 緒 言

高速研削は自動車部品などの量産ラインの生産性を向上できる技術の一つとして古くから注目を集めてきた。砥石周速度の上限は、安全性の観点からおのずと制限されていたが、超砥粒砥石の出現によって飛躍的に増大し、その結果、高速研削の実用化は急速に進展した。最近ではより速い速度で使用可能な砥石が開発され、砥石周速度はますます高速化される傾向にある。中には砥石周速度が 160 m/s を超える超高速研削の研究事例も散見されるようになってきた^{1)~3)}。なおここでは、すでに量産ラインで実用化されている砥石周速度 160 m/s までを単に高速研削、それ以上を超高速研削と呼ぶ。

自動車部品について見てみると、高速研削の適用が最も進んでいるのはエンジン用カムシャフトのプロフィール研削である。鋳鉄製カムの研削は粗材形状から最終仕上げ形状までを 1 工程で加工するのが普通であり、しかも 1 本のカムシャフトには複数のカムが設けられている。このため、他の工程に比べて 1 本あたりの加工時間が極端に長く、加工能率向上の要求が特に高い。これまでも高速研削によって加工能率は向上されてきているが⁴⁾、まだ十分に満足できるレベルに達したとは言い難い。

そこで、筆者らは、従来の 2 倍の研削能率が実現可能なカム研削盤の開発を最終目標として本研究に着手した。具体的には、はじめに平面研削盤を用いた基礎実験によってチルド鋳鉄の超高速研削特性を明らかにし、この結果に基づいて開発機の

目標性能を設定した。さらに、砥石軸の設計、製作、性能評価を行い、それをカム研削盤に搭載して研削性能を評価するという手順で開発を進めた。

本報では、超高速平面研削盤を用いて、カムシャフト用材料であるチルド鋳鉄の超高速研削特性について検討した結果を報告する。

2. 平面研削実験の考え方

チルド鋳鉄の超高速研削特性を明らかにするための実験として、本研究では平面研削方式を選んだ。平面研削は研削抵抗の測定が容易に行えること、工作物径の影響を考慮する必要がないこと、などの利点を有する。したがって、他の研削方式と比べて研削特性の解析が行いやすいと考えた。

カムのプロフィール研削では、図 1 に示すように、ベース円部分、イベント部、トップ部と、工作物が 1 回転する間に加工条件が大きく変動する。特にイベント部では、加工負荷が急増するのを防ぐために工作物速度が極端に遅く設定されてい

Fig. 1 Comparison of cam and surface grinding

* 原稿受付 平成9年9月1日

** 正会員 日産自動車(株) (横須賀市夏島町1)

*** 日産自動車(株)

るため、モデル化が困難である。そこで、こうしたカムの研削をモデル化した平面研削実験を行うのにあたって、本実験ではベース円研削時の加工条件を参考にした。

研削能率は砥石切込み深さと工作物速度の積で求められるため、この研削能率を向上する手段としてはこれらのいずれかまたは両方を増大させることが考えられる。しかも、高速研削では砥石周速度の高速化とあわせて工作物速度も高速化すべきであるという報告もある⁵⁾。ところがカム研削では、プロフィール精度確保やファセット抑制のために工作物速度の大幅な高速化は望めず、研削能率の向上は砥石切込み深さの増大によって行うのが現実的である。そこで、平面研削実験では工作物速度一定のままで砥石切込み深さを増大させることによって研削能率を向上させるようにした。

さらに、本研究で目標としているような研削能率の高い範囲では、砥石径の違いによる研削特性への影響が無視できないほど大きくなることが予想される。そこで、2種類の平面研削盤を用いて、直径の異なる砥石で同一研削条件における研削特性の違いについても実験検討することにした。

3. 実験方法と実験条件

超高速研削実験は、筆者らが開発した超高速平面研削盤⁶⁾を用いて行った。本機は市販の平面研削盤（岡本工作機械製作所、CGM-63）の砥石軸を高速化対応のために改造したものであり、インバータ制御によって最高 200 m/s までの範囲で任意の砥石周速度を設定することが可能である。また、砥石カバーや全閉カバーの板厚増強などによって安全性を向上している。

このほかに砥石径の影響を把握するための実験では、上述の研削盤とは別の従来平面研削盤（日興機械、NSG-52ACE）も使用した。この機械も砥石軸の改造をしており、最高砥石周速度は 110 m/s である。

実験の内容は、

- (1) 研削条件と研削特性との関係
- (2) 砥石寿命特性

とした。実験における主な加工条件を表 1 に示す。

砥石は、カム研削に一般に使用されているビトリファイド CBN ホイールとした。超高速平面研削盤で用いた砥石はコアに CFRP を用いたタイプの砥石であり、高速回転での使用にあたって十分な強度を有する。実験時は、注液式バランスで動バランス修正を行い、砥石軸ハウジングでの振動変位が 0.1 $\mu\text{m p-p}$ 以下となるようにした。

研削液はソリュブルタイプの研削油剤を使用し、巻付けノズルで供給するようにした。ツルーイングにはダイヤモンドロータリーツールを用い、ダウンカットでツルーイングを行った。ただし、砥石の切れ味はツルーイング直後には悪く、工作物がある程度加工すると次第に安定してくる⁷⁾ことから、上述の(1)の実験は砥石の切れ味が安定した状態で行った。

工作物の材種は、自動車エンジン用カムシャフトに一般に使用されている鋳鉄とした。その化学組成は表 2 に示す通りである。自動車用カムと同様に工作物表面にはチル処理を施しており、硬度は HRC 48~50 程度である。

加工中には、工作物固定プレートの下部に設置した 3 分力

Table 1 Experimental condition

	Ultrahigh speed grinding machine	Conventional grinding machine
Grinding wheel	CBN80M200V 350D×10U	CBN80M200V 200D×10U
Wheel speed	80 - 200 m/s	80 m/s
Work speed	8 m/min	8 m/min
Wheel depth of cut	0.075 - 1.2 mm	0.05 - 0.8 mm
Grinding fluid	Soluble type 35 L/min	Soluble type 28 L/min
Truing wheel	SD40P75M	SD40P75M
Workpiece	Chilled casting HRC 48 - 50	Chilled casting HRC 48 - 50

Table 2 Composition of the chilled casting

unit: %					
C	Si	Mn	P	S	Cr
3.33	2.16	0.76	0.044	0.031	0.56

動力計（Kistler, 9257A）によって法線および接線方向の研削抵抗を測定した。

4. 実験結果

4.1 研削条件と研削特性との関係

砥石周速度 V_s を 80~200 m/s の範囲で変化させたときの砥石切込み深さ Δ と単位幅あたりの法線研削抵抗 F_n' 、および接線研削抵抗 F_t' （以下、単に法線研削抵抗、接線研削抵抗と呼ぶ）との関係を図 2、図 3 にそれぞれ示す。法線研削抵抗 F_n' 、接線研削抵抗 F_t' とともに砥石切込み深さ Δ の増大にともなって次第に増大する傾向を示した。その傾きは砥石周速度 V_s が大きくなるほど緩やかになっており、砥石周速度の高速化による研削抵抗低減の効果が表れていることがわかる。

ここで、接線研削抵抗 F_t' について、砥石周速度 V_s 、砥石切込み深さ Δ との関係を表す近似式を求めると、

$$F_t' = 4.4 \times 10^3 \cdot V_s^{-1.0} \cdot \Delta^{0.8} \quad (1)$$

となった。つまり、砥石切込み深さ Δ を一定とした場合、研削抵抗は砥石周速度 V_s が増大するのにともなってそれに反比例して低減する。また、砥石周速度 V_s を増大するとき同時に砥石切込み深さ Δ も増大させれば、研削抵抗 F_t' を一定に保ったままで研削能率 Z' を向上させることが可能である。

このように、超高速研削を適用する場合には、研削条件の選び方に応じて研削抵抗低減をねらうか、研削能率を向上するか、中間的な条件で両方の効果をねらうかという選択が可能である。なお、研削抵抗が低減されれば機械系の弾性変形が抑制されて形状精度の向上が期待できる。さらに、砥石摩耗の進行速度が抑制されることによって、砥石寿命の向上も期待することができる⁸⁾。

接線研削抵抗から単位研削幅あたりの研削動力 P' を算出し、研削能率 Z' との関係を表した結果を図 4 に示す。この図から

Fig. 2 Influence of wheel peripheral speed and wheel depth of cut on normal grinding force

Fig. 3 Influence of wheel peripheral speed and wheel depth of cut on tangential grinding force

研削動力は砥石周速度には依存せず、研削能率 Z' との間に一義的な関係が存在することがわかる。これは、

$$P = F_t \cdot V_s \quad (2)$$

という関係式と式(1)を考え合わせれば自明である。

なお、稲田ら⁹⁾は研削能率の高い範囲において、研削焼けの発生によって比例関係が崩れる領域があることを示しているが、本実験の加工条件の範囲ではこのような現象は認められず、すべてのデータが1本の直線上に分布した。すなわち、砥石軸駆動用モータの出力を決めれば、その砥石軸で実現可能な研削能率 Z' の限界がおのずと決まることになる。したがって、砥石軸を新たに開発する場合、そのモータ出力は研削能率の目標値から図4の関係を使って導き出すことができる。つまり、開発目標とした従来の2倍の研削能率を実現するためには、砥

Fig. 4 Relationship between grinding stock removal rate and grinding power

Fig. 5 Relationship between grinding stock removal rate and specific grinding energy

石軸としては従来の2倍のモータ出力を備えていることが求められる。

さらに、図5には研削能率 Z' と比研削エネルギー U との関係を示す。なお、比研削エネルギー U は次式によって求めた。

$$U = P' / Z' \quad (3)$$

Malkin¹⁰⁾によると、比研削エネルギーは、砥粒の上滑りや掘り起こしに費やされるエネルギー U_{pl} と切りくずの生成に費やされるエネルギー U_{ch} から成る。後者は研削能率 Z' によらず一定であるとしており、本実験の場合には図5から約 30 J/mm^3 となった。

図5において、全体的には砥石周速度 V_s の大小によらずほとんどすべての条件において同一の曲線上に分布している。しかし、詳しく見てみると、研削能率 Z' が $20 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ より小さい範囲では砥石周速度 V_s が大きくなるほど比研削エネルギーがわずかに大きくなっているのがわかる。これは、砥石周速度が大きいと砥粒の上滑りによるエネルギー U_{pl} が大きくなるためと考えられる。

Fig. 6 Influence of wheel diameter on tangential grinding force

また、研削能率 Z' が增大するのにもなって比研削エネルギー U は次第に減少していることから、研削能率 Z' をある一定値以上まで増大させた方がエネルギー的観点からは有利であると言える。その目安は図から $Z' = 80 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ と考えられる。

次に、2通りの砥石径に対して、砥石切込み深さ Δ と接線研削抵抗 F_t' との関係を比較した結果を図6に示す。砥石径の違いが研削抵抗に及ぼす影響は予想以上に大きく、砥石径 200 mm の場合と砥石径 350 mm の場合とでは、接線研削抵抗の大きさに約 1.5 倍の開きが生じた。

一方、次式で求めた接触弧長さ l を横軸にとって図6のデータをプロットし直すと、砥石径の影響が排除され、すべてのデータが同一の曲線上に分布した（図7）。

$$l = \sqrt{\Delta \cdot D} \left(1 + \frac{V_w}{V_s} \right) \quad (4)$$

ここで、 Δ は砥石切込み深さ、 D は砥石径、 V_w は工作物速度、 V_s は砥石周速度である。すなわち、同一加工条件であっても砥石径の大小によって研削抵抗に差が生じる理由は、砥石径の変化にともなって接触弧長さ l が変わるためであることがわかる。なお、工作物速度 V_w に比べて砥石周速度 V_s が十分に大きく、式(4)の代わりに次式を用いても本考察の範囲では 0.002% 以下の誤差しか生じないため、簡略化のために以下では式(5)を用いる。

$$l = \sqrt{\Delta \cdot D} \quad (5)$$

ところで、図7のデータを指数関数で近似すると、接線研削抵抗 F_t' と接触弧長さ l との間には次式の関係が成立することがわかる。

$$F_t' = 0.54 \cdot l^{1.6} \quad (6)$$

したがって、式(5)、(6)から接線研削抵抗 F_t' と砥石切込み深さ Δ 、砥石径 D との関係式を導出すると、

$$F_t' = 0.54 \cdot \Delta^{0.8} \cdot D^{0.8} \quad (7)$$

Fig. 7 Relationship between contact length and tangential grinding force

となる。このとき、図6の各々のデータが確かに式(7)によって近似できることが確認された。

さらに、式(1)、(7)をまとめると、接線研削抵抗 F_t' と砥石周速度 V_s 、砥石切込み深さ Δ 、砥石径 D との間には、

$$F_t' = K \cdot V_s^{-1.0} \cdot \Delta^{0.8} \cdot D^{0.8} \quad (8)$$

(K は定数)

という関係式が成立することが明らかになった。つまり、工作物速度一定の研削条件下では、接線研削抵抗 F_t' は砥石周速度 V_s の -1.0 乗、砥石切込み深さ Δ の 0.8 乗、および砥石径 D の 0.8 乗に比例する。

したがって、砥石切込み深さ Δ を増大させて研削能率を向上させる場合、砥石周速度を高速化するほど、あるいは砥石径を小さくするほど、研削抵抗を低く抑えることができると考えられる。ただし、砥石径を極端に小さくすることは現実的ではなく、これによって研削抵抗を劇的に低減することは期待できない。結局、研削能率を高めて、なおかつ研削抵抗を抑制するためには、砥石周速度の高速化が最も有効な手段になると言える。

4.2 砥石寿命特性

ここでは、砥石寿命に対する超高速研削の効果を確認した実験の結果、すなわち砥石寿命特性について述べる。実験は、従来のカム量産加工ラインで採用されているのと同様の研削条件と、砥石周速度を高速化して同時に研削能率を倍増した超高速研削条件の2通りで行った。それぞれの条件に対して研削量を増大させたときの、研削抵抗、砥石摩耗量、表面粗さの変化を調べた。具体的には、従来研削条件が $V_s = 80 \text{ m/s}$ 、 $Z' = 40 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ 、超高速研削条件が $V_s = 200 \text{ m/s}$ 、 $Z' = 80 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ とした。

実験結果を図8に示す。研削抵抗はツルーイングの影響で初期に大きめの値となったが、すぐに低下し、その後は一定の値が持続した。超高速研削条件では研削能率 Z' を従来の2倍に増大したにもかかわらず、研削抵抗は法線成分、接線成分ともに大幅に低減した。これは、式(8)の関係からも明らかである。

Fig. 8 Changes in grinding parameters with progressing stock removal

また、砥石摩耗量は初期に急激に増大したものの、その後の増加の割合は緩やかであった。たとえば砥石摩耗量が $3\mu\text{m}$ になるまでの研削量を比較すると、従来研削条件では単位幅あたりの研削量が約 $15000\text{ mm}^3/\text{mm}$ であるのに対し、超高速研削条件では $4000\text{ mm}^3/\text{mm}$ であり、2 倍以上の砥石寿命を実現可能であると判断できる。

表面粗さについては、今回の実験の範囲では $Ra\ 0.2\mu\text{m}$ 前後で安定して推移し、両条件の間に顕著な差は認められなかった。

以上のように、砥石周速度 V_s を 80 m/s から 200 m/s に高速化した場合、研削能率 Z' を従来並みのカム研削能率である 40

$\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ から $80\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ に倍増してもなお研削抵抗を大幅に低減することができた。また、同時に砥石摩耗を抑制することができ、砥石寿命を 2 倍に向上できることが明らかになった。

5. 結 論

超高速平面研削盤でチルド鉄の研削実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 工作物速度を一定とした場合、接線研削抵抗 F_t' と研削条件（砥石周速度 V_s 、砥石切込み深さ Δ 、砥石径 D ）との間に次の関係式が成立する。

$$F_t' = K \cdot V_s^{-1.0} \cdot \Delta^{0.8} \cdot D^{0.8}$$

ただし、 K は定数。

- (2) 研削動力の大きさは砥石周速度に左右されず、研削能率に対して一義的に決まる。
- (3) 砥石周速度を 80 m/s から 200 m/s に高速化することによって、従来の 2 倍の研削能率、2 倍の砥石寿命を同時に達成することができる。

参 考 文 献

- 1) 大村悦二, 阿部哲也, 江田 弘: 超高速研削加工の表面創成シミュレーション—超高速研削加工 (第 1 報)—, 精密工学会誌, 59, 8 (1993) 1245.
- 2) 高橋正行, 上田修治, 黒部利次: 超高速研削砥石の開発とガラスの加工, 精密工学会誌, 60, 12 (1994) 1791.
- 3) 庄司克雄, 厨川常元, 稲田 豊, 海野邦彦, 由井明紀, 大下秀男, 成田 潔: 超高速平面研削盤の開発—超高速研削に関する研究 (第 2 報)—, 精密工学会誌, 63, 4 (1997) 560.
- 4) 水谷吉宏, 向井良平, 今井智康: CBN 砥石による高速研削 (第 9 報)—カム研削加工における砥石高周速度化の効果—, 1996 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1996) 657.
- 5) 横川和彦, 横川宗彦: CBN 研削ホイール研削加工技術, 工業調査会, (1988) 174.
- 6) 上田啓雄, 柿添辰雄, 宮原克敏, 太田 稔, 由井明紀: 超高速平面研削盤の開発, 砥粒加工学会誌, 39, 5 (1995) 254.
- 7) K. K. Hon: Characteristics of Force Patterns in CBN Grinding, Proc. 24th Int. MTDR Conf., (1983) 277.
- 8) 和久田 学, 宮原克敏, 太田 稔: 鉄鋼材料の超高速研削特性, 砥粒加工学会誌, 41, 1 (1997) 26.
- 9) 稲田 豊, 庄司克雄, 厨川常元: 超高速研削に関する研究 (第 5 報)—周速 300 m/s 下における材料除去メカニズム—, 1995 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (1995) 229.
- 10) S. Malkin: Grinding Technology, Ellis Horwood, England, (1989) 118.