

研削温度に関する研究 (第一報)

—研削エネルギーの理論的一考察—

是枝賢一・中島 繁

(受理 昭和56年5月30日)

STUDY ON THE GRINDING TEMPERATURE (Report I)

A Theoretical Consideration of Grinding Energy

Kenichi KOREYEDA and Shigeru NAKAJIMA

In this report, a theoretical consideration relating between the wheel-work contact temperature and the grit-work contact temperature are introduced together problems in the rate of shearing and friction energy during surface grinding operation, and then grinding heat energy distribution can be obtained theoretically under a simplified pattern and several assumptions about the abrasive grit cutting edge, but we must wait for the detailed experimental results.

1. 緒 言

研削温度の理論的解析については、小野¹⁾、高沢²⁾、佐藤³⁾、Shaw⁴⁾、松井⁵⁾、Malkin⁶⁾、らによって研究が進められ、砥石研削点温度と砥粒研削点温度についての理論式と計算式が示されている。研削温度の解析には砥粒切れ刃の切削機構とまさつ、それにとまなう研削熱が工作物、砥石、切りくずはどう伝わるかがおまな問題となるが、実際の研削現象はかなり複雑なため、それらを単純化することによる近似的な究明が進められているのが現状で、いまだ未解決な点も多い。

本報では、今まで解明されてきたこれらの研削理論をもとに、平面乾研削について研削抵抗、研削熱の流入割合、切削とまさつについやされるエネルギーの割合、砥石研削点温度、砥粒研削点温度などについての理論的考察をおこなひ、その結果と問題点を検討してみたので報告する。

2. 研削機構のモデル化と研削エネルギー

研削温度の理論的解析をおこなうときには研削抵抗、いわゆる接線研削抵抗 F_t と垂直研削抵抗 F_n を正確には握する必要があることは言うまでもない。そしてそれぞれの抵抗値と抵抗比が研削条件によって変わるこ

とも周知の事実である。佐藤⁷⁾ は砥粒切れ刃を円錐形状とした場合の研削抵抗について理論的に算出し、接線研削抵抗については切りくずのせん断分と砥粒まさつ分とに分けた理論的解析をおこなっている。実際の砥粒先端の形状はまちまちで高さやならびかたも一様でないが理論的解析をおこなうための手段として筆者らは、作用している砥粒切れ刃の切削機構を平均的、かつ単純化された一つのモデルとして図1に示す型を考えてみた。被削面の形状はさきに通過した砥粒の頂角 2γ の角度で切削された山と谷のおうとつのあるかたちをなしており、そこを次の砥粒が連続切れ刃間隔で切削してゆくことになる。いま砥粒先端角 2γ 小さい角 $\alpha=0^\circ$ の砥粒切れ刃を想定し、切りくずはせん断角 ϕ をなして排出されるものと仮定してみる。切削される面は平らな面ではないため、切りくずは三次元的なかなり複雑な形状で排出されることになるが、図に示すごとく二次元的な形に等価的に置き換えて砥粒の

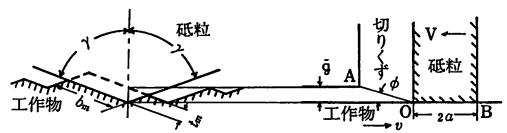


図1 砥粒切れ刃と工作物との切削模型

切削現象を解析することにした。

せん断エネルギーと同時に作用するまさつエネルギーについては図1に示すごとく長さOBの移動熱源の問題として Jaeger の考えかたにより理論的に求めてゆくことにした。

上記のせん断エネルギーとまさつエネルギー以外に、研削現象においては被削面表層の盛りあがりや移動だけの塑性変形や弾性変形、それに砥粒の減耗や破砕、脱落、砥粒と被削面での化学反応、切りくずの運動などに研削エネルギーがつかやされるものと判断される。したがって研削温度の理論的解析を進めるにあたって研削中、同時に進行してゆくこれらの諸現象を個々にわたって検討してゆくことは容易ではない。そこで、これら諸現象につかやされる研削エネルギーをせん断エネルギーとまさつエネルギー、それ以外につかやされるエネルギーの三部に大別して、それぞれにつかやされる研削エネルギーの割合を検討してみた。

3. 研削抵抗と平均砥粒切込み深さ

研削抵抗を求めるのに平均切りくず断面積 a_m の考えかたを用いれば次式⁹⁾ が成り立つ。

$$a_m = w^2 \frac{v}{V} \sqrt{\frac{r+R}{2rR}} \sqrt{\Delta} \quad (3.1)$$

w : 平均砥粒間隔

v : 工作物送り速度

V : 砥石周速度

r : 工作物の曲率半径 (平面研削では $r = \infty$)

R : 砥石半径

Δ : 砥石切込み深さ

さらに接線研削抵抗 F_t ⁹⁾ は次式であらわされる。

$$F_t = k_0 B w^{-2} \Delta^{1-\frac{\epsilon}{2}} \left(\frac{v}{V}\right)^{1-\epsilon} \left(\frac{r+R}{2rR}\right)^{-\frac{\epsilon}{2}} \quad (3.2)$$

B : 研削巾

上式で k_0 は材料による値で次式より求められる。

$$k_0 = k_s a_m \quad (3.3)$$

$$k_s = F_t / B \Delta \frac{v}{V} \quad (3.4)$$

k_s : 比研削抵抗 [kg/mm²]

k_s, ϵ は砥石や工作物の種類によってきまる定数で、研削実験によって求めておく必要がある。

図1より

$$a_m = t_m b_m \quad (3.5)$$

であり、若干の計算¹⁰⁾ のちに平均砥粒切込み深さ \bar{g} は次式

$$\bar{g} = t_m / \sin \gamma = \frac{w}{\sin \gamma} \sqrt{\frac{\sin 2\gamma}{3}} \sqrt{\frac{v}{V}} \sqrt{\frac{\Delta}{2R}} \quad (3.6)$$

となる。

4. 切りくず長さ比 r_g とせん断角 ϕ

いま、砥粒切れ刃の切削機構を図1に示すような流れ型の切削模型に置き換えて解析を進めることにした。このときせん断面における温度の理論的解析にせん断角 ϕ の大小が重要な要素を占めることは言うまでもない。砥粒切れ刃のすくい角 α がきまれば (ここでは M. C. Shaw にしたがい砥粒切れ刃は平均的にすくい角 0 度と仮定) 平均切りくず長さ比 r_g は次式¹¹⁾ であらわされる。

$$r_g = \frac{l_m}{l} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi + \alpha)} \quad (4.1)$$

l_m : 切りくず平均長さ [cm] (実測値)

通常の平面研削で、切りくず平均長さ l は幾何学的に接触弧長さに等しいはずで次式¹²⁾ より求まる。

$$l = \sqrt{2R\Delta} \quad (4.2)$$

実際の研削では流れ型、せん断型、むしろ型、溶融型など切りくず形態はさまざまである。したがってこれらの各切削形態のなかから比較的流れ型に近い切りくずの統計的分布測定によって切りくずの長さや厚みを決定せざるを得ないことになる。また切りくず平均長さ l 、すなわち接触弧長さ全長にわたって、作用している砥粒切れ刃全部が実際に切削しているかどうか疑問であるから結局求められるせん断角 ϕ の値は幅広い範囲の近似計算値ということになる。したがってせん断角 ϕ の厳密解を必要とするなら、負のすくい角をもった砥粒切れ刃がおうつのある被削面を三次元的に切削する際の基礎的切削機構の解析にどうしても頼らざるを得ないであろう。砥粒切れ刃先端の形状を円錐形かあるいは球形とみなすことになれば切削現象はますます複雑なものとなる。

5. せん断エネルギーとまさつエネルギーの割合

すでに述べたように研削エネルギーを砥粒のせん断エネルギー、まさつエネルギー、せん断とまさつ熱以外 (モデル化したせん断とまさつ熱以外のエネルギー) に分けて考えることを提案した。

ここでせん断に要するエネルギーとまさつに要するエネルギーの関係を考えてみる。砥粒と工作物とのまさつ係数 μ については佐藤¹³⁾によれば WA46J と高速度鋼とで研削した場合、 $\mu=0.32$ が得られている。他の文献においても多少条件は異なるがおおよそ $\mu=0.3 \sim 0.4$ 前後が示されている。一方、研削抵抗の接線方向と垂直方向との比 F_n/F_t については、ほぼ2倍前後の値を示すのが通常で、これらの数値を尺度に研削エネルギーのせん断分とまさつ分の割合を考えてゆくことになる。いま接線研削抵抗のうち、せん断分を F_s 、まさつ分を F_f 、 F_s と F_f 以外の分を F_0 とすれば

$$F_t = F_s + F_0 + F_f \quad (5.1)$$

で示される。そして $F_f = \mu F_n$ の関係が考えられるから、式 (5.1) の両辺を F_t で割れば

$$R_{sE} + R_{0E} + R_{fE} = 1 \quad (5.2)$$

となる。ただし

$$\begin{aligned} R_{sE} &= F_s/F_t, R_{0E} = F_0/F_t, \\ R_{fE} &= \mu F_n/F_t \end{aligned} \quad (5.3)$$

M. C. Shaw はせん断エネルギーを全研削エネルギーの1/2と仮定しており、佐藤は R_{fE} を0.7~0.8と報告している。筆者らの解釈によれば最終的に求められた研削熱の配分割合より算出された研削温度の理論値と実測値を比較することによって、初めに仮定された配分割合の妥当性が確かめられることになる。

6. 研削温度の理論的考察

6.1 砥粒研削点せん断面での研削熱流入割合 R_w'

砥粒切れ刃によるせん断熱を図1に示す長さ OA の熱源と考え、この熱源が砥石周速度 V で被削面を移動するものとして Jaeger の理論よりせん断面での切りくずへの熱の流入割合 R_c を求めてみる。

熱源の長さ OA を

$$OA = \bar{g} \cot \phi \quad (6.1)$$

とすると、熱伝達に関する無次元量 L_1 は

$$L_1 = V \bar{g} \cot \phi / 4K \quad (6.2)$$

K : 工作物の温度伝導率 [cm²/s]

\bar{g} : 平均砥粒切込み深さ [cm]

で R_c は次式¹⁴⁾より求まる。

$$L_1 > 5 \quad R_c = \frac{1}{1 + (0.665 \cot \phi) / \sqrt{L_1}} \left. \vphantom{R_c} \right\} (6.3)$$

$$0.1 < L_1 < 5 \quad R_c = \frac{1}{1 + (1.57 \cot \phi) / \bar{f}}$$

したがって工作物に伝わる熱の流入割合 $R_w' = 1 - R_c$ として求まる。

6.2 砥粒研削点せん断面での温度 θ_w'

せん断面に発生した単位時間、単位面積当りの熱量 q_s 、および比せん断エネルギー u_s は次式で求められる。

$$u_s = \frac{R_{sE} F_t V}{ABv} \quad (6.4)$$

$$q_s = \frac{u_s V}{J \cot \phi} \quad (6.5)$$

J : 熱の仕事当量 [g·cm/cal]

工作物側の温度 θ_w' は、Jaeger の移動熱源理論により、

$$\begin{aligned} L_1 > 5 \quad \theta_w' &= 0.752 \frac{R_w' q_s \bar{g} \cot \phi}{2k_w \sqrt{L_1}} \\ &= 0.752 \frac{F_t R_{sE} R_w' \bar{g} V^2}{2k_w \sqrt{L_1} JABV} \quad (6.6) \\ 0.1 < L_1 < 5 \quad \theta_w' &= 0.636 \frac{R_w' q_s K \bar{f}}{k_w V} \end{aligned}$$

k_w : 工作物の温度伝導率 [cal/cm·s·°C]

を得る。一方、切りくずの平均温度 $\bar{\theta}_c$ についても

$$\bar{\theta}_c = \frac{R_c q_s \cot \phi}{C_w \rho_w V} \quad (6.7)$$

C_w : 工作物の比熱 [cal/g·°C]

ρ_w : 工作物の密度 [g/cm³]

となり、 $\theta_w' = \bar{\theta}_c$ となるはずであるから、これより材料定数や流入割合の適否が判断される。

6.3 砥粒研削点まさつ面での温度 θ_w''

まさつ熱についても移動熱源の理論が適用される。

図1に示す OB を砥粒と工作物との接触長さ $2a$ の熱源と考え、これが V の速度で被削面を移動するものとするれば、

$$L_2 = V 2a / 4K \quad (6.8)$$

$2a$: 熱源の長さ [cm]

であり、 a は次の仮定にもとづいて求められた。

切削にあずかる作用砥粒数; は、

$$j = lB/w^2 \quad (6.9)$$

そして、これらの砥粒が研削中の被削面表層硬さ H_V なる面をまさつ面積 $8a^2$ (長さ $2a \times$ 幅 $4a$) の長方形熱源¹⁵⁾で移動するものとすれば、

$$8a^2 = F_n / j H_V \quad (6.10)$$

H_V : まさつ面での表層硬さ [g/cm²]

より、 H_V がわかれば a が求まることになる。

まさつ面での工作物側温度 θ_w'' を求めるには工作物側への熱の流入割合 R_w'' を求めなければならない。前述で式 (6.3) のかわりに式 (6.6) と式 (6.7) を等しくおいても R_w' が求まるが、 R_w'' についても砥粒と工作物間について同様な方法で求めることができる。

砥粒と工作物とのまさつ面に発生する砥粒一個の単位時間、単位面積当りの発熱量 q_f は、

$$q_f = \frac{R_{fE} V H_V}{J F_n / F_t} \quad (6.11)$$

であり、工作物側のまさつ面温度 θ_w'' は、

$$\left. \begin{aligned} L_2 > 5 \quad \theta_w'' &= 0.752 \frac{R_w'' q_f a}{k_w \sqrt{L_2}} \\ &= 0.752 \frac{R_w'' R_{fE} a V H_V}{k_w \sqrt{L_2} J F_n / F_t} \\ 0.1 < L_2 < 5 \quad \theta_w'' &= 0.636 \frac{K R_w'' q_f f}{k_w V} \\ &= 0.636 \frac{R_w' R_{fE} V H_V a \bar{f}}{2 k_w L_2 J F_n / F_t} \end{aligned} \right\} \quad (6.12)$$

となる。一方、砥粒の表面を熱源が速度 V で砥石と逆方向に移動するものと考えて、砥粒側についての接触温度 θ_{st} を求めると、

$$\theta_{st} = 0.752 \frac{R_{fE} R_{st} V F_t / j}{J 4 a V \sqrt{k_q \rho_q C_q} \sqrt{V 2 a}} \quad (6.13)$$

k_q : 砥粒の熱伝導率 [cal/cm²·s·°C]

ρ_q : 砥粒密度 [g/cm³]

C_q : 砥粒の比熱 [cal/g·°C]

で式 (6.12) と式 (6.13) から $\theta_w'' = \theta_{st}$ とおけば、

$R_w'' + R_{st} = 1$ より R_w'' が求められる。

6.4 砥粒研削点温度 θ_g

砥粒せん断面での温度 θ_w' および砥粒まさつ面での温度 θ_w'' が求まれば、砥粒研削点温度 θ_g は、

$$\theta_g = \theta_w' + \theta_w'' \quad (6.14)$$

として求める。ここですくい面における温度上昇が工作物側の温度におよぼす影響については考えてはいない。現在、 θ_w' と θ_w'' の個々についての理論的計算式は Shaw や佐藤によって示されているが、 θ_g につ

いては理論計算だけでなく、実測の面でも研削条件によってどう変わるか明確に示された文献ははまだ見あたらない。

7. 工作物へ流入する研削熱の全割合 R_w

$$\left. \begin{aligned} R_{sE}' &= R_{sE} / R_{sE} + R_{fE} \\ R_{fE}' &= R_{fE} / R_{sE} + R_{fE} \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

とするとせん断分とまさつ分、両方合わせて工作物へ流入する研削熱の流入割合 R_w は、

$$R_w = R_{sE}' R_w' + R_{fE}' R_w'' \quad (7.2)$$

として求められる。上式は砥石と工作物との関係から求めた小野の $R_w^{16)}$ とは異なり、砥粒と工作物との関係から求めた値であることに留意せねばならない。また、今回は工作物に伝わる熱の割合と温度について考察しており、砥粒切れ刃のすくい面で発生する熱は工作物側に伝わらず、ほとんど切りくずに持ち去られるものと判断した。排出される切りくず温度については、後日、切りくずの形状、大きさなどやせん断角の問題とともに実験結果を重ねて理論値と対比することによって、砥粒、切りくず、工作物にどのような割合で熱が伝わってゆくのか究明してゆきたい。

8. 砥石研削点最高温度 θ_m

砥石研削点温度を求めるに、従来からの考えかたにしたがえば、砥石と工作物との接触面に熱源 l が存在するものとして、これが工作物表面上を速度 v で移動するものとして Jaeger の理論を用いている。筆者らの工作物表面温度の測定例¹⁷⁾から判断しても、砥石研削点温度の理論的解析を行なう場合には、長さ l の一様な温度分布をもった移動熱源として取り扱ってもならさしつからないことがわかっている。

$$L_3 = vl / 4K \quad (8.1)$$

となるから、 θ_m は次式より求める。

$$\left. \begin{aligned} L_3 > 5 \quad \theta_m &= 1.5 \times 0.752 \frac{q l}{2 k_w \sqrt{L_3}} \\ L_3 < 5 \quad \theta_m &= 0.636 \frac{K q}{k_w v} f_m \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

いま $R = R_{sE} + R_{fE}$ とすれば、接線研削抵抗 F_t のうち $R R_w$ 分が工作物に流入することになり、そのときの単位時間、単位面積当りの熱量 q は、

$$q = \frac{RR_w F_t V}{JIB} \quad (8.3)$$

であり、通常の研削条件 $L_s < 5$ のときは、

$$\theta_m = 0.636 \frac{RR_w f_m F_t V}{JB \rho_w C_w v l} \quad (8.4)$$

f_m : L_s の値によって変わる係数となる。

ここで $K = k_w / \rho_w C_w$ の関係がある。

9. 理論値と実測値との比較例

以上で砥石研削点温度は研削熱の流入割合 R_w を通じて砥粒研削点温度と理論的に関連づけられたことになる。元来、 θ_m と θ_g は研削中、研削抵抗とともに同時に発生する事象であるから、 F_t 、 F_n および θ_m 、 θ_g の同時測定によって得られた実測値とそれぞれの理論値とを比較検討することによって R_{sE} と R_{fE} の割合が研削条件によってどう変わるかの問題解析に役立つことになる。そして当初、等価的に単純化された切削機構の仮定についてもその是非が確かめられることになる。いわば実際の複雑な研削作用がどのような等価的な研削機構で近似的に理論式であらわされるか、また普遍的な実験式としてより単純化されるかなどの問題としてとらえることができる。

図2は理論式による二、三の計算結果例で、研削条

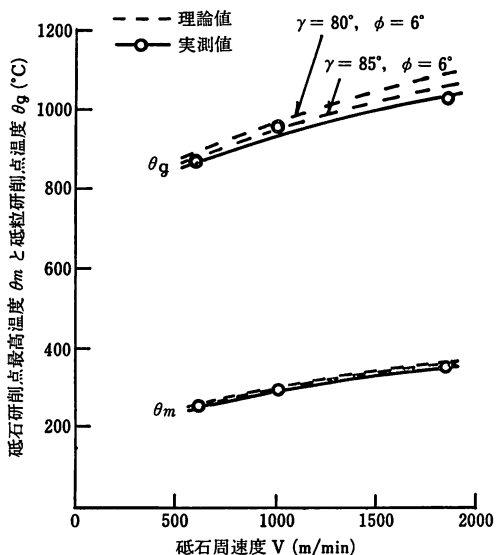


図2 θ_m, θ_g の理論値と実測値との比較

件と理論式に代入した数値と定数を以下に示す。

砥石: WA46J (直径14.9cm, 厚さ0.8cm)

工作物: S45C, 寸法 (0.8 × 2 × 3 cm)

研削方式: 平面乾研削

使用研削盤: ワシノ GS-03C型平面研削盤

研削抵抗測定器: 八角弾性リング型動力計

砥石周速度: 590, 980, 1830 [m/min]

工作物送り速度: 4 [m/min]

切込み量: 15 [μm]

J : 4.27×10^4 [g·cm/cal]

ρ_w : 7.83 [g/cm³]

C_w : 0.115 [cal/g·°C]

H_V : 120×10^5 [g/cm²]

K : 0.147 [cm²/s]

k_w : 0.132 [cal/cm·s·°C]

k_g : 3.8×10^{-3} [cal/cm·s·°C]

ρ_g : 3.9 [g/cm³]

C_g : 0.18 [cal/g·°C]

w : 0.017 [cm] (WA46J)

図2によれば砥粒頂角 2γ 、せん断角中 ϕ の値のとりかたによる θ_m の理論値と実測値との差はほとんどでないが、 θ_g ではいくらか開きがでることがわかった。

研削エネルギーの配分割合 R_{sE} 、 R_{oE} 、 R_{fE} および研削熱の流入割合 R_w 、 R_c 、 R_{st} を表1に示す。流入割合については研削条件が多小異なるが、小野の計算結果と似かよった傾向と値を示しており、砥石研削点温度についても理論値と実測値がほぼ一致していることから判断すれば表1の研削エネルギーの配分割合 R_{sE} 、 R_{oE} 、 R_{fE} についてもおよそ、このくらいの割合で研削エネルギーがつかやされるものと考えてよい。図2に示された実測値は工作物 S45C とクロメル線とで熱電対を形成させ、メモリスコープで砥石研削点温度および砥粒研削点温度を測定したときの値である¹⁷⁾。砥粒研削点温度の測定にあたっては温度検出部

表 1 研削熱の流入割合と接線研削エネルギーの配分割合 $\gamma=80^\circ, \phi=6^\circ$

砥石周速度 V(m/min)	研削熱の流入割合			研削エネルギー配分割合			研削抵抗 (kg)	
	R_w	R_c	R_{st}	R_{sE}	R_{oE}	R_{fE}	F_t	F_n
590	0.85	0.05	0.10	0.20	0.07	0.73	3.72	7.33
980	0.85	0.04	0.11	0.15	0.15	0.70	2.78	5.70
1830	0.84	0.05	0.11	0.13	0.26	0.61	2.00	4.20

先端の時間的変化に対する応答性が最も肝要な課題であり、砥粒切れ刃の基礎的切削機構の解明とともに今後さらに明確にしておく必要がある。

10. 結 言

砥石研削点温度および砥粒研削点温度の理論的解析を進めるにあたって、次のようなことを考慮すれば有用な結果が得られることがわかった。

1) 研削温度は、砥粒切れ刃の切削とまさつの同時進行によって発生するものとして平均的な一砥粒の切削機構をもとにした理論式が展開できる。

2) 接線研削エネルギーをせん断、まさつ、その他の三分野に分類して研削温度を論ずるほうが理論的解析を進めるにあたってより実際的であり、実測値との比較検討に役立つものと思われる。

3) 砥石研削点温度は、砥粒切れ刃の切削とまさつによる結果、生じたものとして判断し、砥粒研削点温度の理論的解析過程における工作物への熱の流入割合の数値をそのまま使って求めることができる。

次報では研削抵抗、砥石研削点温度、砥粒研削点温度の同時実測値による実験式と研削温度の理論的解析結果を比較検討してみたい。

文 献

1) 小野浩二：研削仕上，槇書店 (1962) 34.

- 2) 高沢孝哉：研削面表層温度分布の理論とその測定法，精密機械，30巻11号 (1964) 851.
- 3) 佐藤健児：精密機械，22巻4号 (1956) 127.
- 4) J. O. Outwater, M. C. Shaw: Trans, ASME, Vol. 74, No. 1 (1952) 73
- 5) 松井正己：平面の超仕上に關する研究 (第3報) 平面超仕上抵抗について，精密機械22巻11号 (1956) 447.
- 6) S. Malkin: Thermal Aspects of Grinding, Part 2, Trans, ASME, Ser. B, 96, 11, (1974) 1184.
- 7) 佐藤健児：精密機械，17巻3号，6号 (1951) 88.
- 8) 白井英治：切削・研削加工学下，共立出版 (1971) 32.
- 9) 白井英治：切削・研削加工学下，共立出版 (1971) 37.
- 10) 白井英治：切削・研削加工学下，共立出版 (1971) 33.
- 11) 小野浩二：研削仕上，槇書店 (1962) 26.
- 12) 白井英治：切削・研削加工学下，共立出版 (1971) 29.
- 13) 佐藤健児：プランジカット研削法の研究 (第3報)，精密機械，25巻5号 (1959) 184.
- 14) 白井英治：切削・研削加工学上，共立出版 (1971) 137.
- 15) 佐藤健児：研削温度の測定法，精密機械，30巻1号 (1964) 95.
- 16) 小野浩二：研削仕上，槇書店 (1962) 47.
- 17) 中島繁，是枝賢一：研削温度についての一考察，精機学会秋季大会学術講演会講演論文集，昭和54年10月 (1979) 167.