

研削中の砥粒切れ刃状態の変化について

本 多 良 辰 松 井 正 己*

On the Change in Grain Cutting Edges during Grinding

by

Ryōsin HONDA and Seiki MATSUI

In grinding of SKH4A high-speed steel with A 80 NmV wheel, the change in the grain cutting edges on the wheel surface is studied in connection with the grinding resistance.

The grinding resistance varies periodically with the grinding distance. The area of the wear land of the grain cutting edges and the inclination of the scratch profiles on the finished surface increase, but the tear-out of the grains decreases in number, when the grinding resistance increases.

1. ま え が き

筆者らは、さきに研削焼けについて研究¹⁾を行なったが、これに関連して連続研削時の研削焼け発生の様相を観察中、研削抵抗が周期的に変化することを認めた。この研削抵抗の変化は砥石面の切れ刃の状態が変化するためにおこるものと考えられる。すなわち研削中、砥石面の砥粒切れ刃が脱落、破碎、摩耗をおこして、切れ刃の分布状態や形状が時々刻々に変化し、あるいは切り屑の溶着などにより砥石面が目づまりして、砥石の研削作用に大きな影響を与えるものと思われる。

これらの問題に関して、渡辺²⁾は砥石面の状態と研削作用について研究を行ない、この観点より砥石の研削作用について分類を行なった。また高沢・横山³⁾らは砥石の減耗過程について研究を行ない、砥石の減耗は、初期減耗、定常減耗、末期減耗の過程をたどることを明らかにした。さらに最近、津和⁴⁾は研削中の砥粒切れ刃について追跡の観察を試み、砥粒が脱落、欠損、摩耗等の事象により変化していく状態を調べた。また吉川⁵⁾は砥粒切れ刃の逃げ面摩耗面積率と研削作用との関係について研究を行ない、切れ刃逃げ面摩耗面積率と研削抵抗の間に密接な関係があることを報告した。

これらの研究により、研削機構に関して多くの事項が明らかにされた。しかし研削の現象はその作業条件により種々の様相を呈するものであり、筆者らがさきに述べたような研削抵抗が周期的に変化する事象については、あまり報告されていないように思われる。このような観点から、筆者らは、上述の事象について、砥粒切れ刃状態との関連において検討を行なった。その結果、砥石の減耗と研削抵抗の間に密接な関係があり、減耗の状態により砥粒切れ刃形状が変化し、これが一要因となって研削抵抗が変化することを認めた。

2. 実 験 方 法

実験には小型平面研削盤を使用した。砥石は A 80 NmV, 1号(平形) (150 ϕ ×9.5) 砥石を用いた。目立てはダイヤモンドドレッサにより、ドレッサ切り込み 0.015 mm, 送り速度 0.07 mm/rev で行なった。加工材料は SKH 4 A 高速度鋼を用いた。連続研削時は長さ 92 mm の試片を使用し、研削抵抗を測定するときは 40×3.2×10 mm の試片に取り替えた。砥石周速度を 1300 m/min, 加工

脚注 *東北大学工学部

物速度を 5 m/min, 砥石切り込みを 0.01 mm として, クロスフィードを与えないで研削を行なった。

目立て後研削を続け, 所定回数研削するごとに, 研削抵抗, 砥石の半径減耗量を測定し, 砥石面をすず板に転写し, またアセチルセルロース・フィルムにより砥石面のレプリカを採取した。

研削抵抗は八角弾性リングによる抵抗線歪計式研削動力計で測定し, また抵抗測定時の砥石切り込み量は, 研削前後の加工物の寸法差を 1/1000 mm 目盛のダイヤルゲージで測定した。なお砥石の減耗量は, 砥石面に 20 μ 程度切り込んだ基準面を設け, 砥石面を試片に転写して測定した。

3. 実験結果

3.1 研削抵抗

砥石を目立てしてから, 砥石切り込み送り 0.01 mm で研削を続け, 所定回数研削するごとに研削抵抗を測定した。図 1 は研削を続けるにしたがい抵抗が変化していく状態を示す。図 1 で研削抵抗の変化状態を見ると, 研削初期は多少変動している程度であるが, この期間を過ぎるとしだいに上昇して 130 回付近で極大になり, つぎに下降し始めて 230 回付近で極小になる。これから再び上昇して 350 回付近で極大になり, さらに研削を続けると下降し始める。なお 230 回研削の頃から研削面にびびりマークが現われた。研削抵抗の水平分力と垂直分力の比 T/N を求めた結果は, 抵抗の変化に対応し, 抵抗の高い時期には T/N の値は小さく, 抵抗の低い時期には大きな値を示している。

このように A 80 NmV 砥石で SKH 4 A を研削した本実験では, 研削過程における抵抗の変化はかなり複雑な様相を呈している。

3.2 砥石の減耗状態

上述のように研削抵抗は周期的に変化するが, これに対して, 砥石の減耗状態がどのような経過をたどるかを調べた結果を図 2 に示す。これは砥石の半径減耗量を測定した値であり, 切れ刃先端の摩耗状態を示すものと考えられる。この減耗曲線より各時期における減耗率 (減耗率 = 砥石の減耗容積 / 加工物の研削容積) を求めると図の減耗率曲線のようなになる。初期減耗の期間をへていったん定常化するが抵抗が極大になる 130 回の付近で急激に増大し, 150 回付近でピークを示し, その後減少し始め, つぎの抵抗の極大点では再び増大することなく, いくらか緩急の差が認められる程度であった。

3.3 砥粒切れ刃の状態

砥石目立て直後より最終回までに採取された砥石面のレプリカにより, 砥粒切れ刃の状態を観察した。

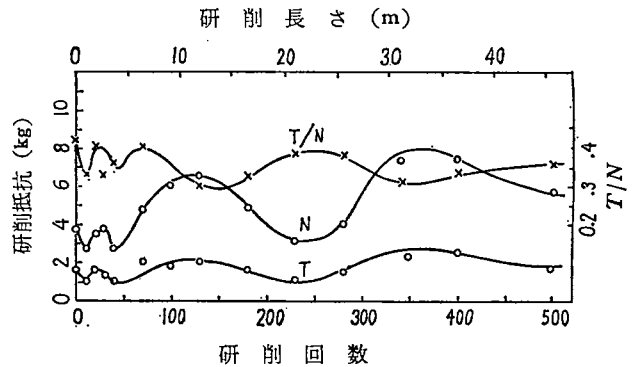


図 1 目立て後研削を続けた場合の研削抵抗の変化
加工材料 SKH 4 A 完成バイト, 砥石 A 80 NmV,
砥石周速度 1300 m/min, 加工物速度 5 m/min, 砥
石切り込み 0.01 mm, 研削幅 3.2 mm, T および N
は研削抵抗の水平および垂直分力。

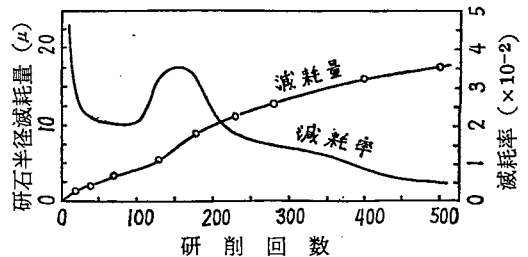
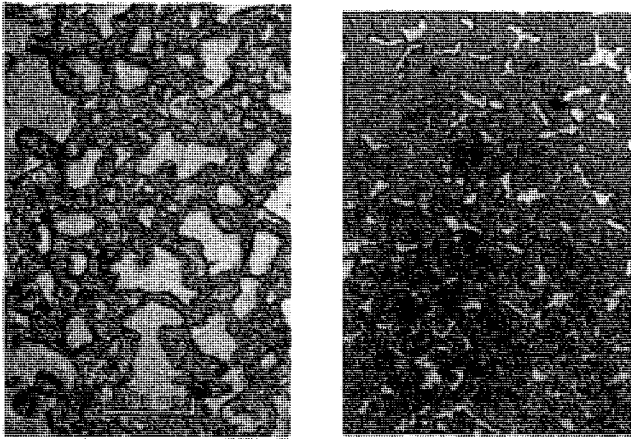


図 2 砥石の減耗状態

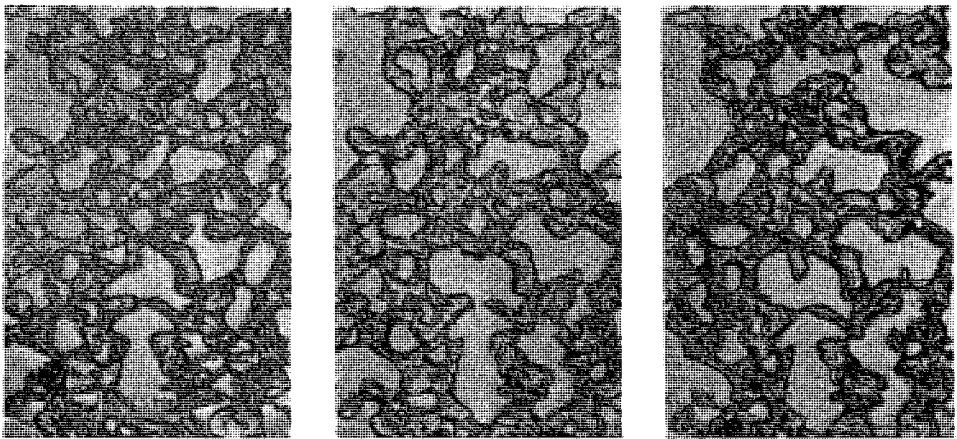


(a)顕微鏡観察による砥石面の状態 (b)すず板に転写された切れ刃痕

図3 砥石面の砥粒の分布状態 (40回研削後)

図3の左の写真は低倍率の顕微鏡で観察した砥石面の砥粒の状態を示す一例である。これは 1.7×2.5 mmの範囲の砥石面を表わしているが、写真に現われている部分は砥石の表面 $20 \sim 30 \mu$ 程度の深さ範囲とみなされ、写真に現われている砥粒が全部切れ刃として作用しているわけではない。右の写真は同一場所をすず板に転写して求めた切れ刃の状態を示す。左右の写真を対照すれば、砥石面に分布している砥粒のうちどれが切れ刃として作用しているかをおおよそ知ることができる。

図4は砥石面の同一箇所を順を追って観察したものである。このように観



(a) 目立て直後 (b) 130回研削後 (c) 280回研削後

図4 目立て後研削を続けた場合の砥石面状態の変化



(d) 500回研削後

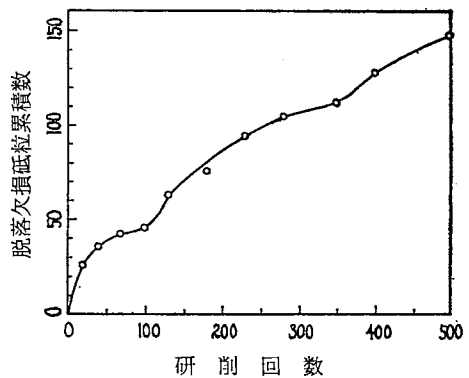


図5 砥石面の砥粒の脱落、欠損の状態
砥石面 21.2 mm^2 について観察

察すると、砥粒が脱落や欠損して砥石面の状態が変化していく過程がよくわかる。本実験に使用した砥石は結合度 N で比較的硬めの砥石に属し、砥粒の脱落や欠損は比較的少なく、砥石面の砥粒は 500 回研削後も初期の砥粒が大部分をしめていることが認められた。このような観察を砥石面の円周に沿う 15 mm の区間で 5 箇所について行ない、観察された砥石面の合計面積 21.2 mm^2 について、研削を重ねるにしたがい観察面より消えうせ、脱落あるいは欠損（部分欠損を含む）したとみなされる砥粒数を数えた結果を図 5 に示す。

図 5 より研削抵抗が上昇傾向をたどる区間では砥粒の脱落や欠損が少なく下降傾向をたどる区間では多くなる傾向が認められる。

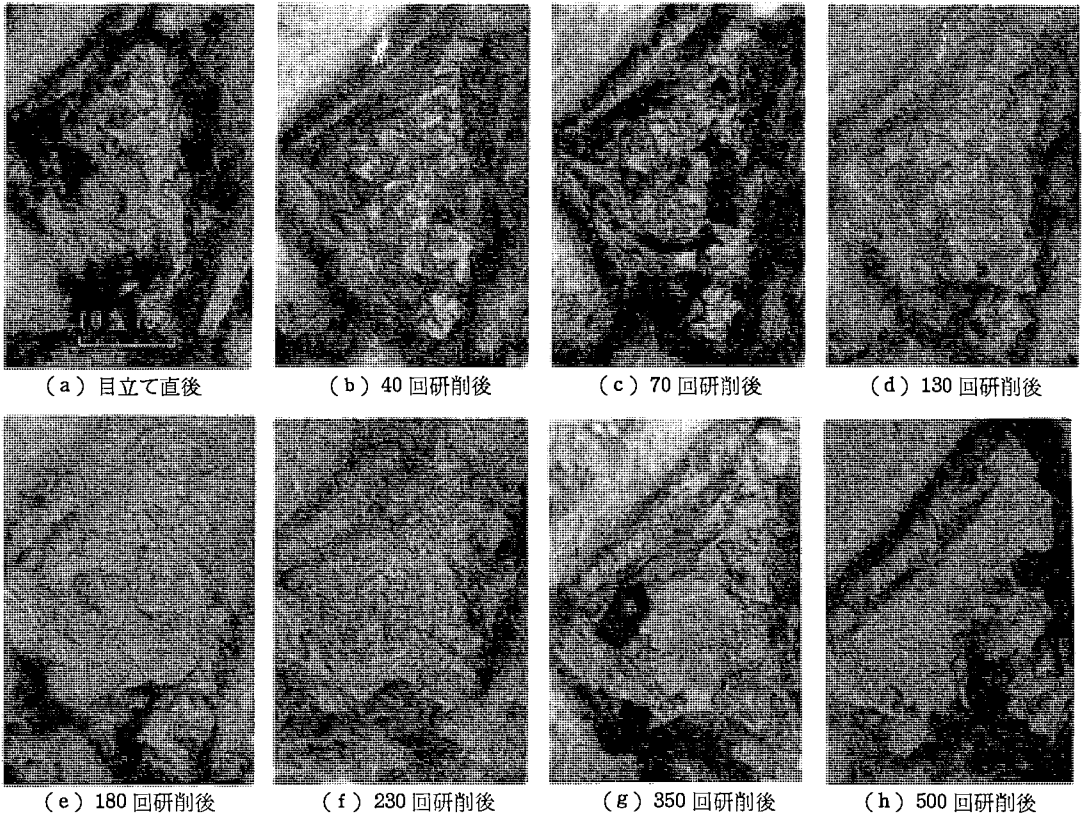


図 6 目立て後研削を続けた場合の砥粒切れ刃状態の変化（砥粒 I について）

つぎに一箇の砥粒に着目し、追跡的観察を試みた。図 6 は位相差顕微鏡写真による観察の一例を示す。これまでも報告⁶⁾されているように、切れ刃の頂部が摩耗して平坦化している様子がうかがわれる。この摩耗部の面積を測った結果を図 7 に示す。

摩耗部面積は研削が進行するに従い全般的には増大傾向をたどるが、単純に増大するとは限らず、増減消長を示し、抵抗が高いときには摩耗面積は増大し、低いときには減少する傾向を示すようである。ことに抵抗が極小値を示す 230 回研削時はそれまでに形成された摩耗部が

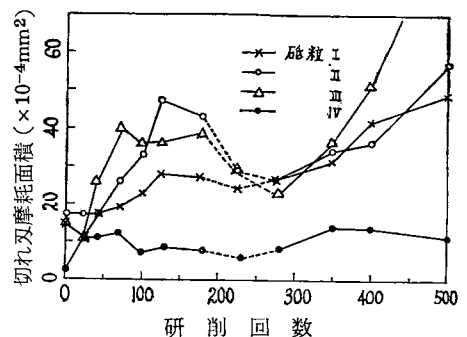


図 7 砥粒切れ刃の摩耗状態

細分化され、あれている様子が観察された。そうして通常の摩耗面にくらべて異質な状態を示し、かつ摩耗部も明確でなかったので図ではこの部分を破線で示した。

砥石面の砥粒切れ刃をすず板に転写する方法は、すずの付着層の厚さの不均一、砥石面とすず板の当りぐあいなどの影響を受け、切れ刃が十分な信頼性をもって転写されるとはいえず、不確実な要素を含んでいる。しかし従来から行なわれている方法であり、手法も比較的簡単なので、この方法により切れ刃面積率や切れ刃数を測定した。

砥石面の砥粒切れ刃が転写されたすず板をネガにして切れ刃痕を印画紙に焼き付け、この転写印画紙面の反射率を測って、切れ刃面積率を求める方法を試みた。反射率の測定には NF 粗度計を用い、測定紙面の切れ刃の存在しない部分を標準反射面を選び、標準面と測定面の反射強度を測定して反射率を決定した。光線の入射角は、紙面の光沢やアラサの影響を受けず、紙面の切れ刃痕の黒点の度合のみが反射強度に影響するような角度を取った。一方印画紙上の切れ刃痕を切り取り、その重量を測定して切れ刃面積率を求め、反射率と対比すると図 8 のような関係を示した。この線図より切れ刃面積率の較正を行なうことができる。

このようにして求めた切れ刃面積率を図 9 に示す。目立て直後は切れ刃面積率は小さいが、それ以後は研削抵抗に対応して抵抗が大きい時期は切れ刃面積率も大きくなる傾向がみられ、図 7 に示される結果はこのような巨視的測定結果からも裏づけられる。

転写面の切れ刃痕を計数して平均砥粒間隔 w の値を求め、また佐藤⁷⁾により提案された連続切れ刃間隔の算定式 $a=w^2/b$ (ここで b は仕上面の条痕幅) により a の値を求めた。これらの値も図 9 に示される。測定結果は 230 回研削までのものが示されているが、 w 、 a とも研削初期は大きな値を示しているが、研削がしばらく続けば下降して定常化する。 w の値はその後あまり変わらないようであるが、 a の値は多少の変動を示し、230 回研削時は大きな値を示している。

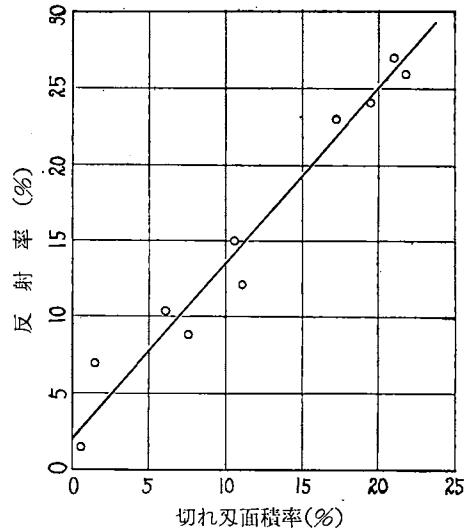


図 8 転写印画紙面の反射率と切れ刃面積率の関係

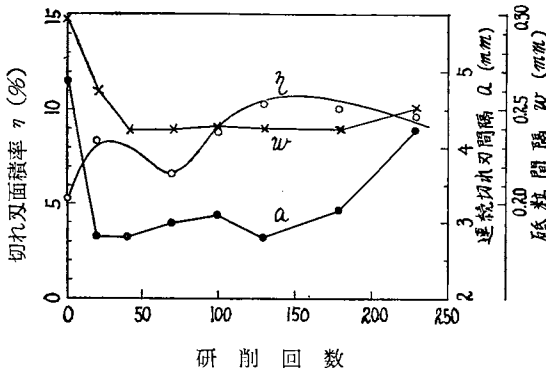


図 9 切れ刃面積率、砥粒間隔、連続切れ刃間隔の変化

研削回数

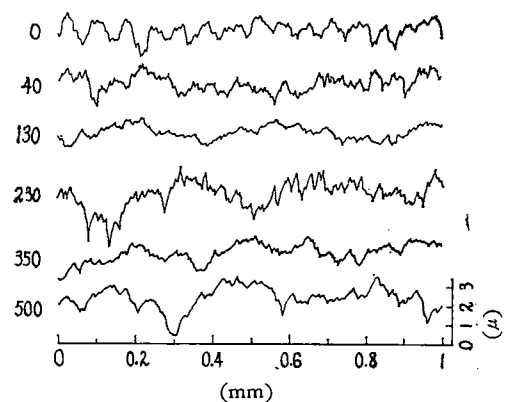
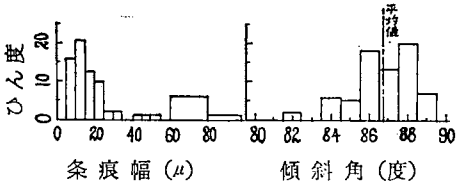


図 10 仕上面のアラサ曲線

3.4 仕上面の研削条痕の状態

研削試片の仕上面を触針式アラサ検査機で測定した。図10に仕上面のアラサ曲線の代表的なものを示す。図1の研削抵抗の曲線と対照すれば、直視的に抵抗が高いときは研削条痕は鈍く、抵抗が低いときは条痕が鋭いことがわかる。

仕上面の研削条痕は砥石面の砥粒切れ刃が転写されて出来たものと考え、さらに条痕の断面形状を二等辺三角形と仮定すれば、条痕の幅と深さより条痕面の傾斜角が推定され、切れ刃の形状が類推される。



(a)条痕幅の分布状態 (b)傾斜角の分布状態

図11 仕上面の研削条痕の幅および傾斜角の分布状態の一例
40回研削後の仕上面、測定範囲1mm

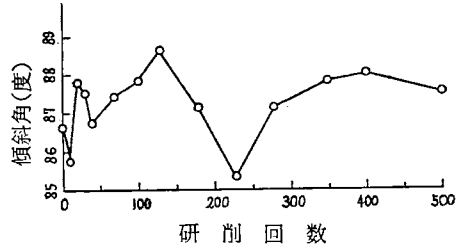


図12 条痕傾斜角の変化
1mm 区間に存在する巾60μ以下の条痕の傾斜角の平均値

まず仕上面の条痕について幅の分布状態を調べた。図11(a)にその一例を示す。本実験における研削面の条痕は、幅60~80μ以上の大きな条痕と、これに重じようする40~60μ以下の小さな条痕よりなっている。この場合切れ刃の形状は幅60μ以下の条痕によって表わされているものと考えられる。

そこで幅60μ以下の条痕についてその傾斜角を調べた。図11(b)に条痕傾斜角の分布状態の一例を示す。それぞれの試片について傾斜角の平均値を求め、研削回数について図示すると図12のようになる。これを研削抵抗の変化状態と対照すると、抵抗が高いときは傾斜角が大きくなり、抵抗が低いときは傾斜角は小さくなり、抵抗の変化状態と密接な関係があることがわかる。このことから研削抵抗は砥粒切れ刃の形状にかなり支配されると思われる。

4. 検 討

研削抵抗に影響する砥石面の状態因子としては、切れ刃の分布状態および形状が主要なものであり、砥石が減耗すると砥石面の切れ刃の分布状態や形状が変わり、これらの事項が研削抵抗に影響を与えると考えられる。

上述の実験および観察の結果から砥石面の砥粒の脱落、欠損の状態は、研削抵抗が上昇傾向をたどるときは減少する傾向を示し、抵抗が下降傾向のときは増加する傾向を示すことがうかがわれる。また砥石の半径減耗率は抵抗がピークを示す130回研削付近で急増し、抵抗が下がりかける時期にピーク値を示している。一方砥粒切れ刃の摩耗部面積を測った数例についても、研削を続けるにしたがい、全般的には増加傾向をたどりながらも、抵抗が山を示す130回研削時には摩耗面積は大きく、谷を示す230回研削時は小さくなる様子が認められた。さらに仕上面の条痕の傾斜角は抵抗の変化に対応していることがわかった。これらの事象より、研削中抵抗が変化する現象はつぎのように説明されよう。

すなわち、砥石面の砥粒の脱落や破砕が渋滞状態のときは、砥粒切れ刃は摩耗して平坦化が進行し、切れ刃が鈍化して抵抗が上昇する。しかし抵抗がある程度高くなると砥粒の脱落や破砕が活発化し始め、切れ刃の欠損や微小破砕のため摩耗部面積が減少して、切れ刃が鋭利になり、抵抗が下降し

始めるものと考えられる。このような事象の繰り返しが研削抵抗の周期的上昇および下降となって現われるのであろう。

そこで砥粒切れ刃の形状と研削抵抗の関係について検討を試みよう。佐藤⁸⁾は砥粒切れ刃が円錐であると仮定し、研削機構を幾何学的に解析して研削抵抗の式を導いた。この佐藤の式より、砥石面の状態因子と研削抵抗の関係を求めると、次式のように表わされる。

$$T \propto w^{-2} \cdot a^{0.76} \cdot \sin\phi$$

$$N \propto w^{-2} \cdot a^{0.76} \cdot \sin\phi \cdot \tan\phi$$

ここで T 、 N は研削抵抗の水平および垂直分力、 w は砥粒間隔、 a は連続切れ刃間隔、 ϕ は砥粒頂角の半角である。

上式では切れ刃の形状は円錐の頂角の半角 ϕ で代表される。研削条痕は砥粒切れ刃の形状が写されて出来たものと考えて、さきに測定した仕上面の条痕の傾斜角を上式の ϕ に代入すると、傾斜角は $85^\circ \sim 89^\circ$ であるから、 $\sin\phi$ の値はほとんど1に近く、一定とみなしてもさしつかえないが、 $\tan\phi$ の値は相当顕著に変化する。ゆえに上式において ϕ のこの範囲の変化に対して、 T の値はほとんど変化しないが、 N の値は相当大きく変わることがわかる。実験結果より、 ϕ と T および N の関係を求めると図13のようになる。 ϕ がわずかに増しても N は急激に上昇することが認められるが、 T はわずかに上昇する程度である。この T の上昇は摩擦項の影響によるものであろう。なお N の値は相当なばらつきを示しているが、その上限および下限の線上にあるものについて a の値をみると、上限では大きく下限では小さいようである。ゆえに実験値のばらつきには、砥石面の切れ刃の分布状態がある程度影響しているように思われる。

このように砥石面の状態と研削抵抗の関係について、佐藤の式により検討すると、本実験の結果をある程度説明することができるようである。しかし上述の検討は、つぎに述べるような仮定に立ってなされたものである。すなわち、(1) 砥粒切れ刃は円錐形である。(2) 砥粒は剛性支持されている。(3) 条痕面の傾斜角より砥粒切れ刃の頂角を類推できる。これらの仮定については疑問視される問題が含まれており、抵抗と切れ刃形状の関係については、今後さらに検討が必要と思われる。

5. む す び

A80NmV 砥石で高速度鋼 SKH 4 A を連続研削した場合、研削抵抗が周期的に変化する現象を認めた。この問題について、砥粒切れ刃の状態変化の観点から観察および検討を行なった。その結果、砥石は研削抵抗が上昇する時期は減耗が比較的少なく、抵抗が下降する時期に減耗が著しくなることを認めた。また仕上面の研削条痕の傾斜角は、抵抗が高いときは大きく、抵抗が低いときは小さく、抵抗との間に密接な関係があることを認めた。これらの事象より、砥粒の破砕が渋滞状態のときは切れ刃面の摩耗により切れ刃が鈍化して抵抗が上昇し、砥粒の破砕が活発化すると切れ刃が鋭利化して抵抗が下降するため、研削抵抗が周期的に変化したものと考えられる。

終りに本研究について御指導をたまわった東北大学佐藤教授、ならびに実験結果の検討にさいし種々御教示をいただいた金沢大学高沢教授に厚く御礼申し上げます。また実験に協力していただいた東北大学学生庄司克雄君、ならびに実験結果の整理に協力していただいた金沢大学石田助手に謝意を表します。

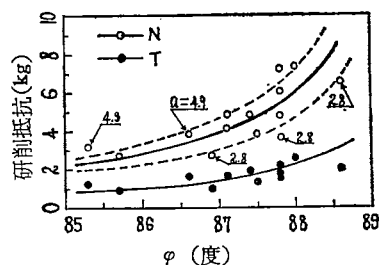


図13 研削条痕の傾斜角より類推された ϕ と研削抵抗の関係

参 考 文 献

- 1) 松井正己, 本多良辰: 研削焼けに関する研究, 精機学会講演会前刷 (昭和39年4月) 126.
- 2) 渡辺半十: 精密機械, 18. 8. (1952), 258.
- 3) 高沢孝哉, 横山恭男: 金沢大学工学部紀要, 2. 1. (1957), 51.
- 4) 津和秀夫: 精密機械, 26. 4. (1960), 199.
- 5) 吉川弘之: 精密機械, 28. 5. (1962), 286.
- 6) たとえば, 津和秀夫: 精密機械, 27. 11. (1961), 719.
- 7) 佐藤健児: 切削理論 (1), 砥粒および砥石による加工, (昭和31年), 6. 誠文堂新光社.
- 8) 佐藤健児: 精密機械, 17. 3. (1951), 88.

(昭和39年9月15日受付)