

焼入れ焼もどした軸受鋼の被削性に及ぼす硬さの影響

山本重男*・中島宏興*²

Influence of Hardness on Machinability of Quenched and Tempered Bearing Steel

Shigeo YAMAMOTO and Hirooki NAKAJIMA

Synopsis :

Machinability of a bearing steel of which hardness was changed in a wide range by quenching and tempering was investigated. Sawing, drilling and turning were carried out for work materials of the hardness of HV180~770 and cutting time, thrust force and resultant cutting force were measured respectively.

1) In all machining methods the minimum cutting resistance (cutting time) was observed at the hardness of about HV350. Multiple regression analysis was applied between the above measuring values and the mechanical properties of work materials. The regression equation indicates that the cutting resistance increases with increase of the tensile strength, hardness, the elongation and reduction of area.

2) It was suggested that the minimum in the cutting resistance at the hardness of HV \approx 350 was brought about by the formation of the strong built-up edge. The cutting resistance increased in the hardness range of HV180~250 and 430~550. The former is due to an enlargement of the chip shear region and the latter to an increase of the deformation resistance per unit area of the chip shear region.

3) Sawtooth like chips were produced, when work materials of the hardness of HV550~700 were machined at high speed. The mechanism is considered that the chip shear region is subjected to the shear deformation by softening arising from the concentrated generation of heat.

Key words : machinability; bearing steel; quenched and tempered samples; sawing; drilling; turning; mechanical property and machinability; cutting mechanism; sawtooth like chip.

1. 緒 言

最近、耐摩耗性の優れた切削工具や剛性の高い工作機械が出現し、このため、従来は研削仕上げされていた焼入れ焼もどし状態の高硬度の鋼が仕上げ切削され¹⁾²⁾、生産工程の省略と生産速度の増大につながっている。

本実験では焼入れ焼もどしによって硬さを大幅に変化させた鋼について、鋸刃切削、ドリル切削、旋削における切削抵抗の測定や切削部の観察を行い、高硬度の鋼の切削機構について検討した。

2. 供 試 材 料

供試材料は精密工学会・切削加工専門委員会・被削性小委員会の共同実験試料である軸受鋼 (SUJ2) を用いた。Table 1 にその化学組成を示す。

熱処理はソルトバスを用いて行い、焼入れは被削材を 550°C に予熱後 820°C で 40 min 保持し油冷した。焼もどしは大気中の各温度で 60 min 保持し空冷した。

Fig. 1 は焼入材を各温度で焼もどした試料の常温における機械的性質を示す。引張試験片の形状は平行部直径 4 mm・長さ 20 mm であり、切削加工後熱処理してエメリーパーで平行部を仕上げた。試験は引張速度 1 mm/min で行った。引張強さ (T.S) は焼もどし温度 250°C の試料で 230 kgf/mm² 程度と極大値を示し、その時の降伏強さ (Y.S) は 180~190 kgf/mm² である。

Table 1. Chemical composition of sample (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SUJ2	0.96	0.24	0.39	0.008	0.016	0.05	0.03	1.37

昭和 62 年 10 月本会講演大会にて発表 平成元年 3 月 27 日受付 (Received Mar. 27, 1989)

* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

*² 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals)

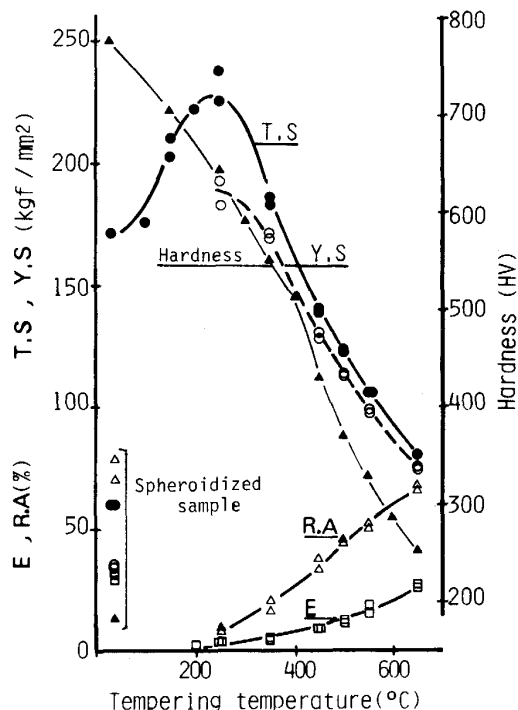


Fig. 1. Mechanical properties and hardness at room temperature of samples tempered at various temperatures.

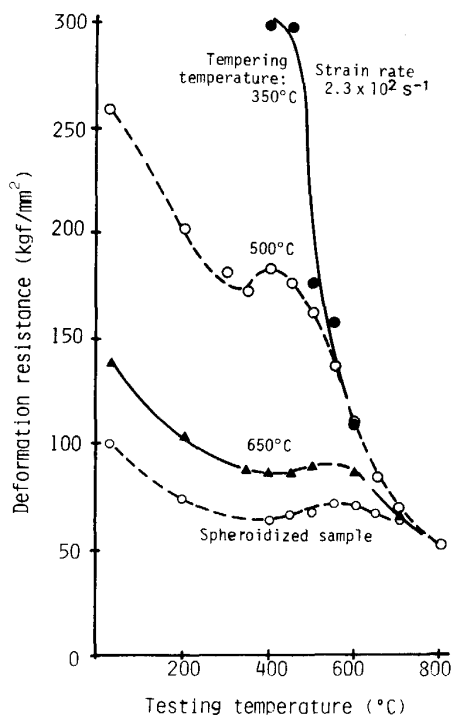


Fig. 2. Deformation resistance values measured at elevated temperatures with high strain rate.

比較材として用いた球状化材は引張強さ 60 kgf/mm^2 、降伏強さ 35 kgf/mm^2 である。焼もどし温度 200°C 以下では脆性破壊を示すため、十分な強度に達していない。

伸び (E)、絞り ($R.A$) は焼もどし温度 250°C から増加し始めている。硬さは焼入れ状態で $\text{HV}770\sim780$ を示し、焼もどし温度の上昇と共に急激な減少を示している。

Fig. 2 は焼入れ焼もどし材切削時の昇温域を中心とした衝撃圧縮試験結果である。試験片の形状は直径 10 mm ・長さ 10 mm であり、向かい打型のハンマーにより衝撃的に圧縮した。平均ひずみ速度は $2.3 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ であり、各試験温度で 20 min 保持後試験した。変形抵抗値 (K_f) は次式によって求めた³⁾。

$$K_f = E / [V \cdot \ln(h_0/h)]$$

ここで、 E :ハンマーのもつエネルギー、 V :試験片の体積、 h_0 :試験前の試験片の厚さ、 h :試験後の試験片の厚さ、である。

球状化材および焼もどし温度 650°C の試料は $500\sim600^\circ\text{C}$ の試験温度で青熱脆性のピーク域を示している。しかし、 500°C で焼きもどした試料の青熱脆性域は 400°C でピークを示し、その領域は狭い。 350°C で焼きもどした試料は 450°C 以上の試験温度で急激な軟化を示した。

3. 被削性試験法

被削性試験は鋸刃切削、ドリル切削、旋削について行った。鋸刃切削試験は鋸盤を改造した被削性試験機を用いた⁴⁾。その特長は、1) 手動弓鋸用の刃 (ハンドソー) が取り付けられ、2) 鋸刃に加わる荷重が調整でき、3) 切削速度が可変できることであり、このほか、切削抵抗 (主分力および背分力) の測定、切りくず生成状態の観察を行うための切削状態の急停止機能をもつ。被削材の形状は幅 25 mm ・厚さ 10 mm ・長さ 100 mm である。

鋸刃に加わる荷重は非切削状態において、被削材の位置に取り付けた小型検力計に鋸刃の中央部を接触させ、所定の荷重になるように調整した。切削抵抗の測定は工具動力計を用いて、鋸刃のすくい面に加わる主分力および逃げ面に加わる背分力について行った。これらの切削抵抗は各ストロークにおいて、切削始めと終わりの段階で急上昇するが、鋸刃の中央部近傍における切削では安定した極小値を示すので、この値を測定した。工具摩耗の測定は同一のハンドソーを用いて被削材を 10 回切削後に行った。さらに、機械鋸刃 (マシンソー) を用いて、切削時間と逃げ面摩耗幅を測定した。いずれも水溶性の切削剤を用いた。

鋸刃切削試験の切削条件の設定は、通常の往復型鋸盤で用いられている切削速度 $15\sim25 \text{ m/min}$ の範囲において、一定形状の鋼および非鉄材料を荷重 $10\sim25 \text{ kgf}$ に

変化させて切削し、切削時間を求めた。次いで、各材料ごとに硫黄快削鋼 (SUM 24L) の切削時間を分子とした切削時間比率 (%) を求めた。そして、各材料ごとに知られている被削率と上記の切削回数比率を比較して、双方が比例関係を示す切削条件として、切削速度 20 m/min, 荷重 15~20 kgf を選定した。

ドリル穿孔抵抗の測定に用いたボール盤はフロアタイプテーブルを持つ直立型であり、動力計はひずみゲージ式でトルクとスラスト測定用である。ドリルの形状は、直径 6 mm で先端角は軟らかい鋼切削用の 118° と硬い鋼用の 135°, 逃げ角は二段で 6° と 20° とした。試験片の厚さは 10 mm で切削速度 7~17 m/min, 送り 0.07 mm/rev, 切削油を用いて試験した。

旋削抵抗の測定は切削性試験旋盤を用いて行った。工具は高硬度材料の切削に適したセラミック (サイアロン系) であり、その形状は TNGN-332 で角度ホーニングがなされている。切削条件は切削速度 10~150 m/min, 切込み深さ 1.0 mm, 工具送り量 0.05 と 0.1 mm/rev である。さらに切削の急停止状態を得るための特殊な刃物台を用いて切削部を採取し³⁾, 切込み深さの中央断面について光学顕微鏡による観察およびマイクロピッカース硬さの測定を行った。なお、マイクロピッカース硬さは荷重が小さい場合通常のピッカース硬さより 50~100 程度その硬さが大きかった。試験片の形状は直径 100

mm・厚さ 10 mm である。

4. 被削性試験結果

4.1 鋸刃切削

Fig. 3(a)(b)に鋸刃切削による切削抵抗, 切削時間, 工具逃げ面摩耗幅を示した。(a)はハンドソーを用いた切削である。切削抵抗主分力は焼もどし材の硬さにあまり依存しないが, 背分力は硬さの大きい試料で減少傾向を示している。この原因は被削材の硬さが異なることによって構成刃先の生成挙動が異なるためと思われる。切削時間は被削材の硬さ HV400~500 で極小値を示している。特に, 硬さ HV600 近い被削材より球状化材 (HV180) のほうが切削時間が増しており, 構成刃先の生成状態に影響されていると思われる。そして, 逃げ面摩耗幅は硬さの大きい被削材ほど増大する傾向を示している。(b)はマシンソーを用いた切削である。切削時間は各切削速度域において被削材の硬さ HV350~400 で極小値を示している。逃げ面摩耗幅はハンドソーによる切削と同一傾向を示している。

4.2 ドリル切削

Fig. 4(a)(b)はドリル穿孔抵抗を示す。スラストはドリル先端角が異なる場合でも, 被削材の硬さ HV350 近傍で極小値を示しているが, 全体的にはドリル先端角 118° のほうが 135° より低下している。ドリル先端角が

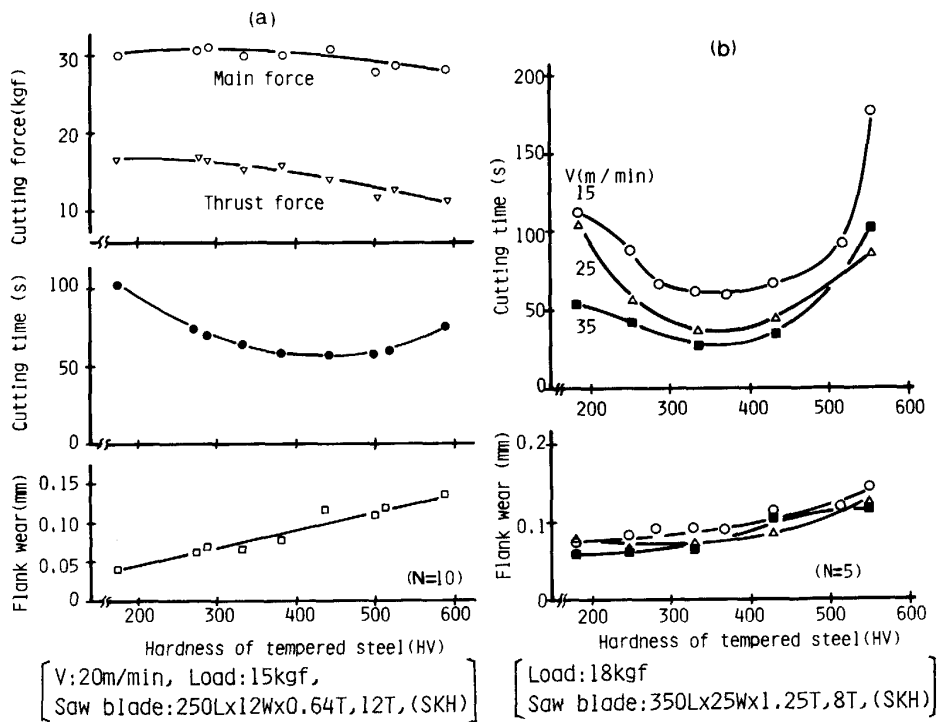


Fig. 3. Sawing test of tempered and spheroidized samples. Hand saw was used in (a) and machine saw in (b).

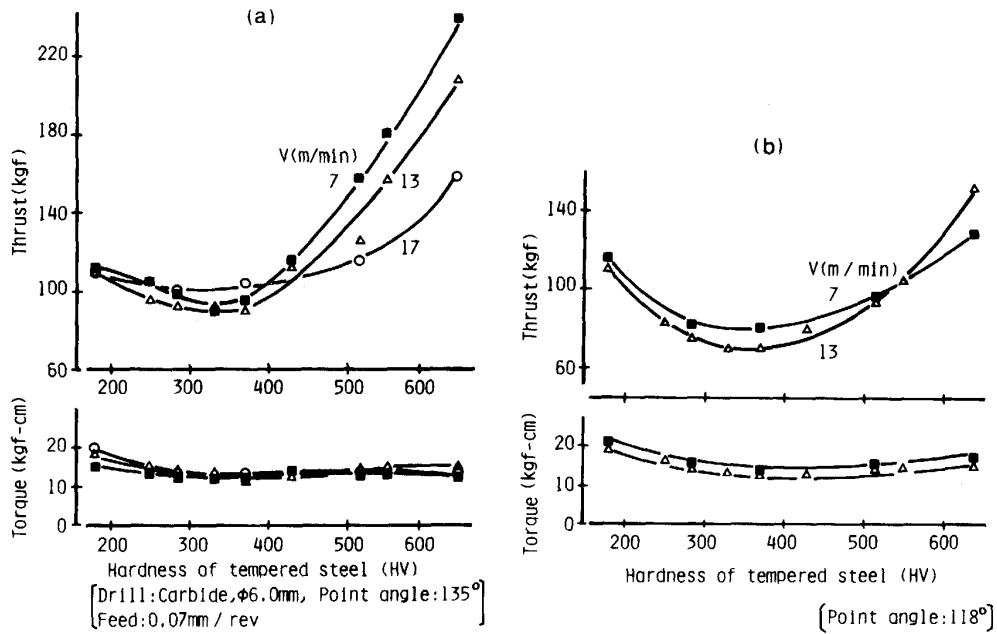


Fig. 4. Drilling force of tempered and spheroidized samples with drill of different point angle.

大きくなるほど切削状態は不安定となりやすく、このため安定した構成刃先が生成しにくく、スラストを増していることが予想された。トルクは球状化材 (HV:180) を穿孔時に若干増加している程度で、被削材の硬さとの関連は少ない。穿孔抵抗におよぼす切削速度の影響は構成刃先や発熱状態と複雑に関連しているためか、一義的でない。

4.3 旋削および切削部の観察

Fig. 5 は旋削工具に加わる主分力、送り分力、背分力から求めた旋削抵抗合力 (R) である。工具送り量 (F) 0.1 mm/rev においては被削材の硬さ HV350 近傍で各切削速度域における抵抗合力が極小を示している。このような傾向は $F:0.05$ mm/rev においても低速切削域で認められる。

Photo. 1(a)~(d) は切削速度 20 m/min において切削部の急停止装置を用いて採取した切りくず生成状態である。工具の切刃部がホーニングしてあるため切りくず裏面側にホーニングの形状が転写されている。Photo. 1(a) は球状化材を切削中のものであり、(b) に示した焼もどし温度 650°C の切りくず生成状態と類似している。(c) の焼もどし温度 500°C の被削材は焼もどし温度 650°C の被削材より切りくず厚さが減少し (d) の焼もどし温度 350°C の被削材ではこの傾向はさらに著しい。工具-切りくず接触長さは焼もどし温度 350°C の被削材で減少し、ホーニング部分だけで切削している。しかし、この場合でも抵抗合力は Fig. 5 の硬さ HV550 の試料に示

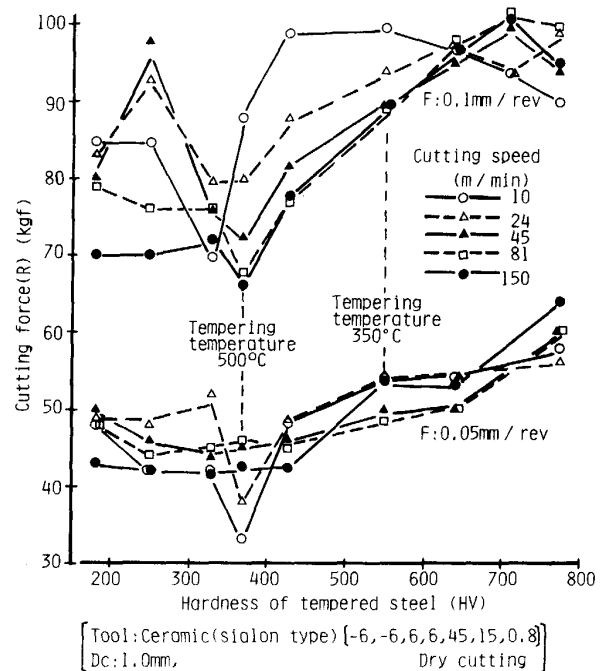
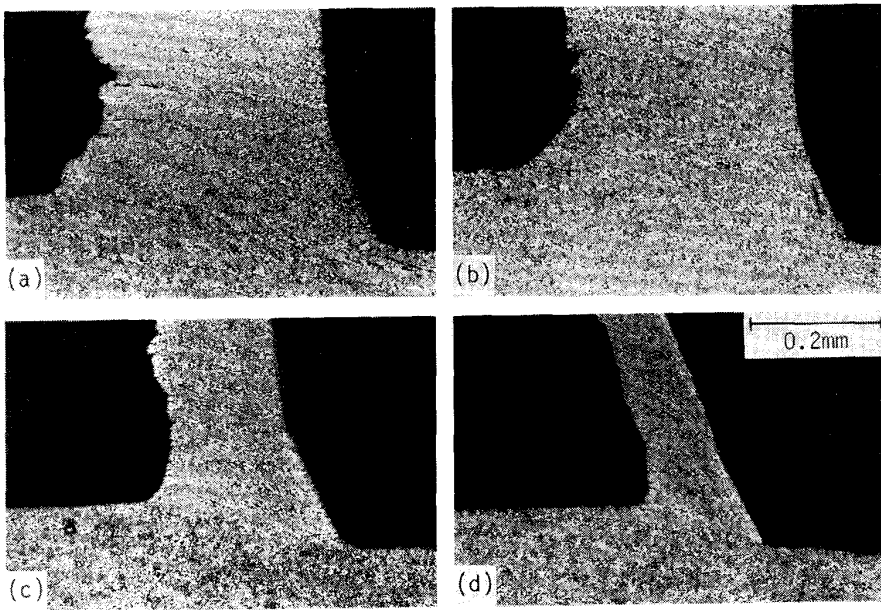


Fig. 5. Resultant cutting force (R) of tempered and spheroidized samples in turning.

すように、焼もどし温度 500°C の被削材 (硬さ HV370) より大幅に増大している。このことは焼もどし温度 500°C の被削材を切削中の切りくずせん断域に比較して単位面積当たりの変形抵抗が著しく増大していることを示唆している。

Fig. 6(a)~(d) は Photo. 1 で示した切削部のマイク



(a) Spheroidized
 (b) Tempering temperature : 650°C
 (c) Tempering temperature : 500°C
 (d) Tempering temperature : 350°C
 Cutting speed : 20 m/min
 Feed : 0.1 mm/rev

Photo. 1. Chip forming state of tempered and spheroidized samples in turning.

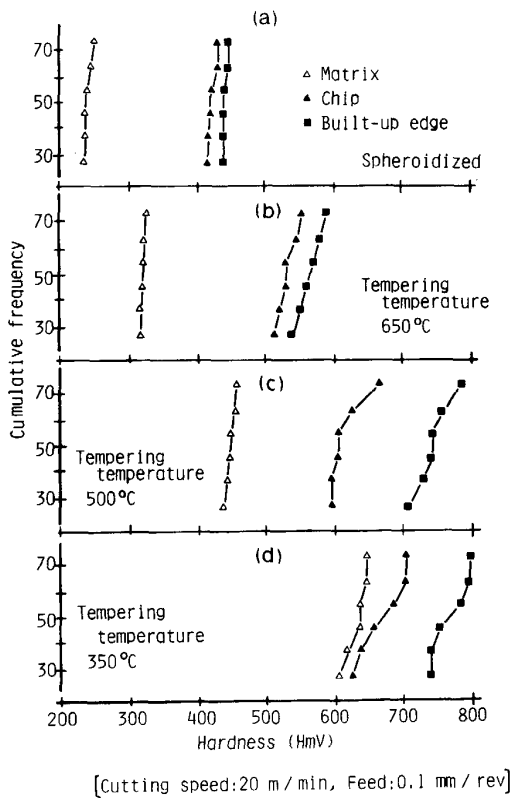


Fig. 6. Micro-Vickers hardness (Load : 50 gf) of chip forming region in Photo. 1 of tempered and spheroidized samples in turning.

ロビッカース硬さである。基質、切りくずおよび構成刃先と思われる部分の硬さをそれぞれ測定した。測定点は各 10 点ずつであるが、確率紙にプロットして 25% 以下および 75% 以上の各点を除いた形で示した。Fig. 6

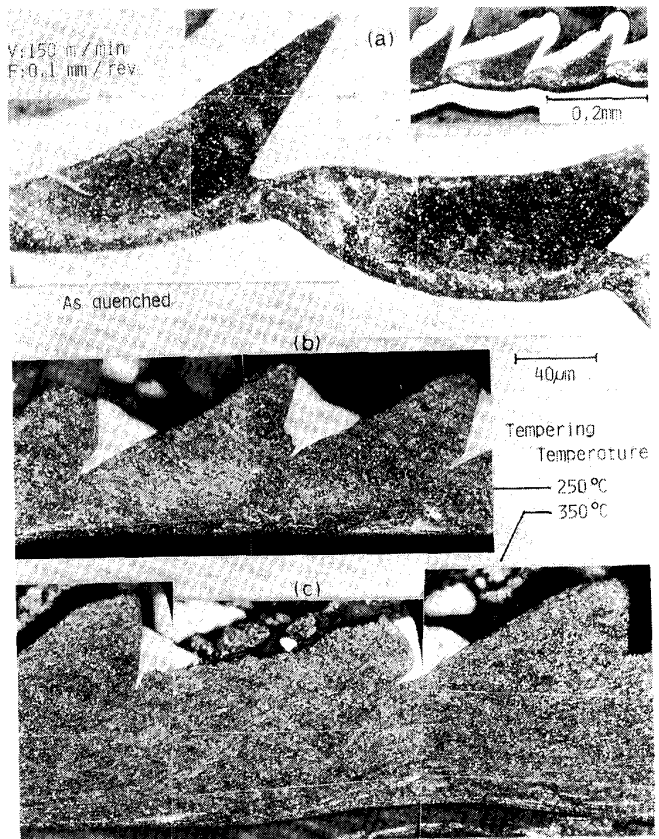


Photo. 2. Appearance of chips of as quenched and tempered samples in turning.

(a)の球状化材では切りくずと構成刃先の硬さに大差ないことが示されており、(b)の焼もどし温度 650°C の場合も同様な傾向である。これに対して、(c)の焼もどし温度 500°C の場合には切りくずと構成刃先の硬さの差

が大きく、顕著な構成刃先が生成していることがわかる。(d)の焼もどし温度 350°C の場合、基質と切りくず硬さの差は小さく、発熱によって切りくずが軟化された状態と思われる。構成刃先の硬さは(c)の場合を若干上回る。

Photo. 2(a)~(c) に高速切削域における被削材の焼もどし温度と切りくず形状の関連を示した。(a)の焼入れ状態の被削材の切削では鋭い切りくず表面が示されているが、焼もどし温度が上昇するに従って、(b)(c)のように切りくず表面の鋭さが減少している。さらに、焼もどし温度 450°C では通常の凹凸の少ない切りくず表面となる。Photo. 2 に示した切りくずはその形状から鋸歯状切りくずと呼ばれている。その生成機構については、例えば、切りくずせん断域におけるせん断ひずみがある限界に達したときにクラックが発生することによるとされている⁵⁾。しかし、本実験では赤熱した状態の鋸歯状切りくずが生成しており、加工硬化やクラックの伝

播は考えにくい。

Fig. 7 に各切削速度域における切りくず硬さと被削材の硬さの関係を示した。この際の切りくず硬さは Fig. 6 で示した切りくず硬さより、最大 HV100 程度減少しているが、Fig. 7 の切りくずは切削抵抗を測定の際に採取したものであり、切削時間が 10~20 s に刃物台の下に堆積した昇温域にある切りくずどうしの中で、ある程度の焼なましが行われたためと考えられる。硬さの小さい被削材の切削において、切りくずは加工硬化している。そして、被削材の硬さ HV ≒ 550 ではその切りくず硬さは被削材の硬さとほぼ同じであり、加工硬化は切削部の発熱によって回復したことがわかる。さらに硬さの大きい被削材の切削では、切削速度 150 および 81 m/min において赤熱した鋸歯状の切りくずが生成した。そして、切削速度 24 m/min においても切りくずの酸化色から推察して、被削材の焼もどし温度を大幅に上回る発熱が予想され、これらのため、その硬さは被削材を下回る。一方、切削速度と切りくず硬さの関連を見ると、切削速度 81 と 150 m/min では切りくず硬さが近似しているが、24 m/min ではこれらの硬さを上回っている。低速切削域ほど切りくず厚さが増して、切りくずせん断域でのひずみ量が多いことと、発熱が低いことに原因していると思われる。

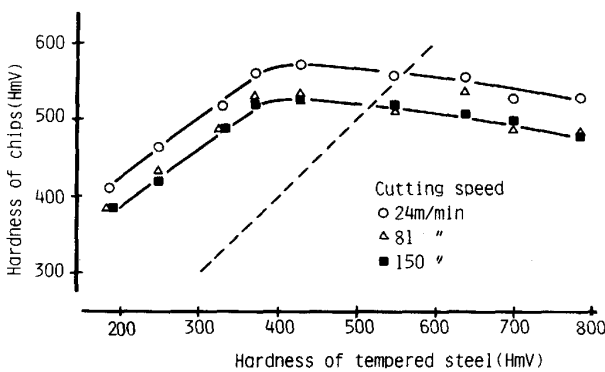
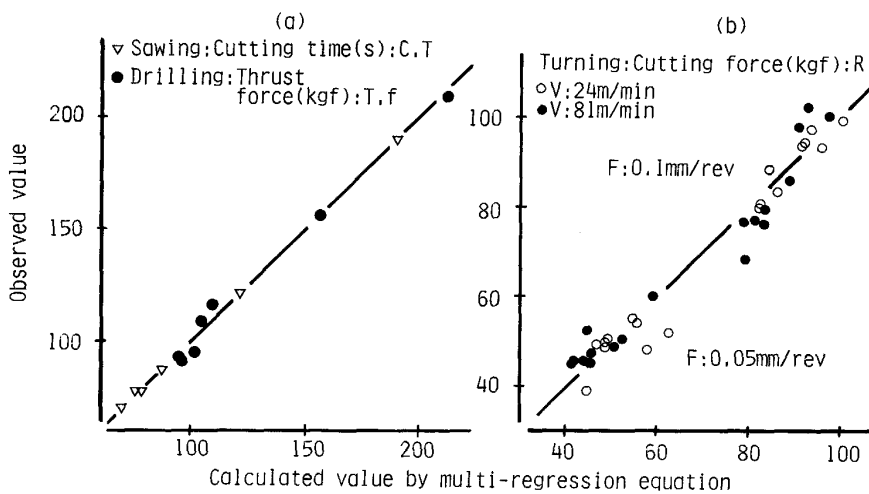


Fig. 7. Relation between hardness of chips and hardness of work materials in turning.

5. 考 察

5.1 切削抵抗と機械的性質の関係

焼入れ焼もどした軸受鋼のドリル切削と旋削の際の切削抵抗および鋸刃切削の際の切削時間について、機械



• C.T = -1173.9 - 1.39(HV) + 10.73(T.S) + 15.86(E) + 5.79(R.A)
 (Cutting speed: 15m/min in Fig.3(b))
 • T.f = -132.9 + 1.42(T.S) + 4.98(E)
 (Cutting speed 7m/min in Fig.4(a))

• R = -25.9 + 0.067(HV) + 0.854(E) - 0.058(V) + 757(F)

Fig. 8. Relation between observed value and calculated value in sawing, drilling (a) and turning (b).

的性質との関係を重回帰分析した。この際、機械的性質のそれぞれの値については危険率 10% 以下のものだけを計算式に取り込んだ。Fig. 8(a) は鋸刃切削の切削時間 ($C.T$) およびドリル切削のスラスト ($T.f$) について示したもので、切削時間は引張強さ ($T.S$) と伸び (E) との相関が大きい。すなわち、引張強さが大きいほど切削時間は増すが、逆に、引張強さが小さく、伸びが大きい場合にも切削時間は増す。スラストは引張強さと伸びだけにより相関を示している。Fig. 8(b) は旋削の際の旋削抵抗合力 (R) であり、切削速度 24 m/min と 81 m/min の値について示した。旋削試験においては切削速度 (V) が低速から高速までであり、切削条件と機械的性質の R におよぼす効果を検討した。 R は工具送り量 (F) の増加によって著しく増し、 V の上昇に伴って減少している。一方、硬さ (HV) および伸び (E) が増すほど R が増加しており、同図 (a) に示された引張強さに替わって硬さが R との相関を増している。鋸刃切削で用いた切削時間 ($C.T$) はドリル切削および旋削と同じように、鋸刃に一定送り量が加わるような切削条件では切削抵抗に置き換わる性質の値であろう。従って、切削形態の異なる場合でもその切削抵抗は材料の機械的性質で表すことが可能である。奥島⁹⁾ は被削性におよぼす材料の性質として、軟らかさ・硬さおよび、ねばさ・もろさの概念を用いて定性的な説明を行っているが、この考え方を切削抵抗の観点から具体的に実証した形となっている。

5.2 切削抵抗と切削挙動の関連

硬さの異なる鋼の切削抵抗を切削挙動との関連で考察する。Fig. 7 に示したように、硬さの小さい球状化材の旋削時には加工硬化が大きく被削材の硬さよりも切りくず硬さが増す。しかし、焼入れ状態のように硬さの大きい被削材では発熱量が大きく熱軟化のため切りくず硬さは被削材より小さくなる。前者では切りくず表面が比較的平滑であるが、後者の切りくずは凹凸の激しい鋸歯状である (Photo. 2)。この変化はある硬さ以上の被削材で突然生ずるものでなく切削部における加工硬化と発熱量の連続的な変化に基づくと思われる。Photo. 1 の切りくず生成状態で示したように球状化材や高温焼もどした被削材の旋削では、切りくずせん断領域が広い。そこでの単位面積当たりの変形抵抗 (Fig. 2) は小さくても、せん断領域の大きいことが原因となって抵抗合力が増している (Fig. 5)。これに比較して、焼もどし温度 350°C の被削材では切りくずせん断領域が縮小している (Photo. 1)。しかし、切削合力は増しており (Fig. 5)、これは切りくずせん断域における単位面積当たりの変形

抵抗が著しく増大していることを示している。このことは Fig. 2 の変形抵抗値の著しい増大と一致する。すなわち、試験温度 450°C よりの急激な軟化から推察して、Photo. 1(d) の切りくずせん断域の温度は 450°C 以下で、かつ、加工硬化された切りくずが被削材と同程度の硬さまで軟化される発熱量に達していることが推測された (Fig. 6(d), Fig. 7)。

旋削の際、焼もどし温度 500~550°C で硬さ $HV \approx 350$ の被削材は抵抗合力の極小値を示した。この原因としては顕著な構成刃先の生成によることが認められた (Fig. 6(c))。構成刃先が工具すくい角を増すような形で生成しており、切りくずせん断域を狭めていることによる。

Fig. 3 において、ハンドソーとマシンソーを用いた切削では切削時間の極小値が硬さの異なる被削材で現れている。ハンドソーで切削したときには刃幅の厚いマシンソーの場合より切削部の発熱が小さく、硬さの大きい被削材側で構成刃先が最適な形状を保持しているためと思われる。そして、ドリル切削についてもこのような構成刃先の生成と被削材の硬さの関連が予想された。

旋削中に生ずる鋸歯状切りくずは焼もどし温度 350°C 以下の硬さ $HV550$ 以上の鋼を高速切削したときに生じた (Photo. 2)。鋸歯状切りくずの生成は、切りくず全体が赤熱状態であることと凹凸のピッチが規則的であることから、切りくずせん断域における周期的な発熱に伴う著しい軟化域で生じるせん断変形によることが推察された。Fig. 9(a)~(d) は凹凸の最も激しい鋸歯状切りくずの生成過程を模式化したものである。(a) から (b) への過程では見かけ上の切りくずせん断角 (ϕ) が増加し、切りくず流出速度 (V_c) が増している。しかし、(b) の状態では切りくずせん断域の縮小によって切削抵抗が

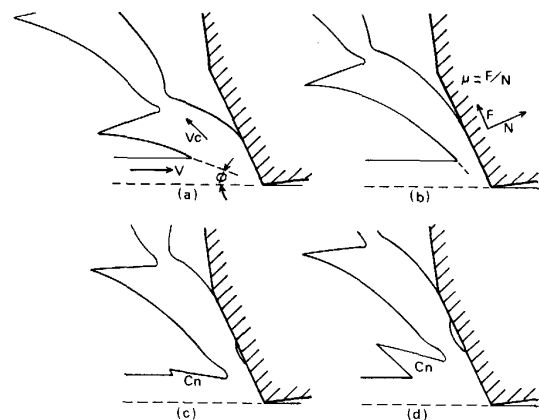


Fig. 9. Schematic representation of forming process of sawtooth like chips.

減少し、工具-切りくず間の発熱は急激に低下し始め、この部分の摩擦係数 (μ) を増大させる。Fig. 9(c) では μ の増大によって前のサイクルの切りくずの流出が抑制され、切りくずせん断角が減少する形で切削抵抗が増す。この場合切りくずせん断域に発熱が集中し、その部分が軟化してせん断変形が生じ、新たなサイクルの切りくず (Cn) が生成し始める。(c) から (d) の過程では前のサイクルの切りくずが新たなサイクルの切りくずに押し上げられ、最も切りくず厚さの減少している部分で座屈が生ずる。そして、新たなサイクルの切りくずは流出速度を増しながら Fig. 9(a) となる。

Photo. 2(a) の切りくずは赤熱状態に達した後の組織であり、激しい変形跡はあまり認められないが、その形状から前述のような鋸歯状切りくずの生成機構が推察された。さらに、Photo. 2(b)(c) に示した焼もどし温度 250°C および 350°C の被削材の切りくずは、Fig. 9(c) に示した過程で、発熱が集中する段階において塑性変形も同時に生じたため、切りくず表面に丸みが生じたものと思われた。

6. 結 論

焼入れ焼もどしによって硬さを HV180~770 に変えた軸受鋼を切削形態の異なる鋸刃切削、ドリル切削、旋削し、それぞれ切削時間、スラスト、旋削抵抗合力を測定した。そして、これらの結果を機械的性質との関連および切削機構の観点から考察した。

1) 各切削形態において被削材の硬さ HV350 近傍に切削抵抗 (切削時間) の極小値があり、これらの値を機械的性質との関連で重回帰分析した結果、被削材の引張強さ・硬さおよび伸び・絞りが増すことによって切削抵抗が増大する計算式が得られた。

2) 硬さ HV350 程度の被削材は切削部の加工硬化と熱軟化の度合いによって強固な構成刃先を生成させ、抵抗合力の極小を招いていることが示唆された。一方、硬さ HV180~250 と HV430~550 の被削材を切削したときの切削抵抗の増大は、前者でせん断領域の増大によるが、後者ではせん断領域における単位面積当たりの変形抵抗の増大による。

3) 硬さ HV550~770 の被削材では高速切削域で赤熱した鋸歯状切りくずが生成した。鋸歯状切りくずの生成機構は、切りくずせん断域において、発熱の集中によって生じた軟化域でせん断変形が引き起こされるためと推察された。

文 献

- 1) 大谷敏明, 藤瀬健領, 横川 洪: 精密工学会誌, **54** (1988), p. 1969
- 2) 新谷一博, 藤村善雄: 精密機械, **51** (1985), p. 1053
- 3) 荒木 透, 山本重男, 内仲康夫: 鉄と鋼, **54** (1968), p. 444
- 4) 山本重男, 中島宏興: 実用新案, 出願番号 63-139936 (1988)
- 5) 中山一雄: 精密機械, **43** (1977), p. 117
- 6) 奥島啓式: 機械の研究, **17** (1965), p. 1463