

論文

過冷オーステナイト軸受鋼の切削加工における寸法制御

藤岡 康夫*・室 博*²

Dimension Control of Workpieces on the Machining of Bearing Steel in Supercooled Austenite

Yasuo FUJIOKA and Hiroshi MURO

Synopsis :

On machining of bearing steel in supercooled austenite, the dimensions of a workpiece change due to the thermal contraction and the martensitic transformation in the cooling process after cutting.

In order to obtain the precise dimensions of the workpiece at room temperature, it is necessary to predict the dimension changes and to adjust the tool paths to compensate for them in the machining process of the steel in supercooled austenite. A method to predict the dimension change was established. A dimension control system for an NC machine tool was designed and its performance was proved by experiments.

The obtained results are summarized as follows;

- (1) The thermal contraction rate of supercooled austenite of bearing steel SUJ3 is $2.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.
- (2) The final dimension (L) of a workpiece is expressed by the following equation in terms of the temperature (T in $^\circ\text{C}$) of the workpiece during cutting and the machined dimension (l) of supercooled austenite.

$$L = l(1.0077 - 2.2 \times 10^{-5} \times T)$$
- (3) In the case when the tool wear rate is small, the final dimension is controlled precisely by means of the developed dimension control system which makes the compensation of the machining dimension for the dimension change predicted at each temperature of workpieces on the basis of the thermal contraction rate of supercooled austenite.

1. 緒 言

高炭素クロム軸受鋼を用いて軸受部品を製造する工程は、例えばベアリングレースについては圧延素材-熱間鍛造-焼なまし-切削加工-焼入れ・焼もどし-研削加工というのが一般的である。この工程には多くの加熱冷却工程が含まれており、熱エネルギーの省略を図りたいが高炭素鋼という素材の本質上、上記の工程をとらざるを得ないのが現状である。また、焼入れの際に発生する変形のため、研削代を多くとらざるを得ず、これも熱エネルギー及び研削加工対策が必要な点のひとつであった。

これに対して著者らはすでにオースカッティングと称する方法を考案し、提案した¹⁾。それは Fig. 1 に示したように、焼入れの際に M_s 点直上の温度で冷却を中断し、その状態（過冷オーステナイト）で切削加工を行い、その後再び冷却を行ってマルテンサイト変態を完了させようとするものである。この方法によれば切削加工前の焼なましが省略できるばかりでなく、適切な切削

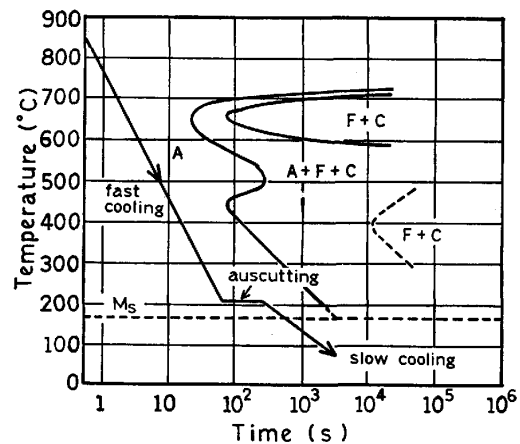


Fig. 1. TTT diagram of SUJ 3 and auscutting.

条件を選ぶことにより研削代の低減を図ることができる可能性がある。著者らはこの方法が原理的に可能であることをすでに見出していたので、本報では材料の熱収縮や変態膨張を考慮に入れた寸法精度の制御法を確立した結果について述べる。

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 5 月 23 日受付 (Received May 23, 1983)

* エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株) (NTN Toyo Bearing Co., Ltd., 1380 Higashikaizuka Iwata Shizuoka pref. 438)

*² エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株) 工博 (NTN Toyo Bearing Co., Ltd.)

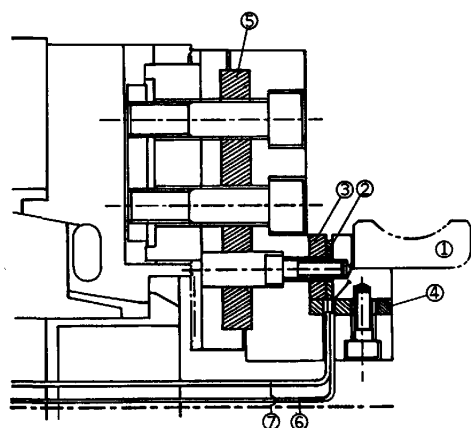
2. オースカッティング方法と熱収縮及び変態膨張による寸法変化の測定

2.1 試験片及び実験方法

試験片として高炭素クロム軸受鋼 (SUJ3) の軸受素材 (ラジアル玉軸受 6320† 内輪: 外径 138 mm, 内径 95 mm, 幅 50 mm) を用いた。SUJ3 の化学組成は Table 1 に示すごとくである。本試験片 (ワークピース, 以後ワークと略記する) はローリング鍛造法により作製し, 鍛造後従来どおりの球状化焼なましを施したもの (硬度 HB 190) である^{†2}。

Table 1. Chemical compositions of SUJ 3.

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|----|
| 0.95-1.10 | 0.40-0.70 | 0.90-1.15 | <0.025 | <0.025 | 0.90-1.20 | — |



① workpiece ② ceramic heater ③④ insulating material ⑤ thermocouple ⑥ heater lead wire

Fig. 2. Insulated chuck.

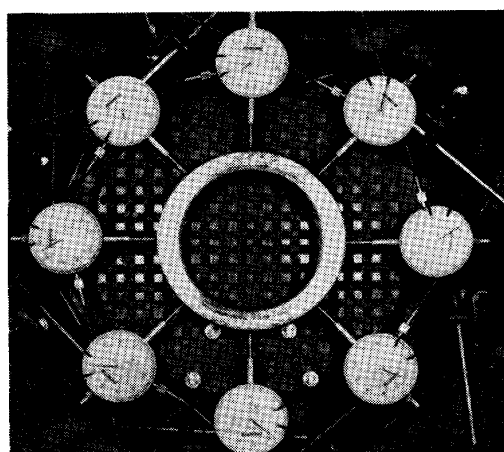


Photo. 1. Measuring device of dimension change after auscutting.

† 単列深みぞ玉軸受の呼び番号で, 軸受内径, 外径及び幅寸法はそれぞれ 100 mm, 215 mm, 47 mm のものである。

†² オースカッティングの実用にあたっては熱エネルギーの削減を図るため, 球状化処理後冷却せずに連続して焼入れを行う¹⁾のであるが, 本研究は切削における寸法制御が主眼であるので従来工程の球状化焼なまし完了品を用い, 焼入工程を分離した実験を行った。

ワークを電気炉中で 825°C~900°C の焼入温度に約 50 min 加熱した後, 200°C の油中に急速冷却を行い過冷オーステナイト状態とした。油中に約 3.5 min 保持し, ワーク温度が M_s 点直上の約 220°C になった時に取り出し, 迅速に旋盤にチャッキングしてオースカッティングを実施した。切削条件については 3.2.2 項で詳述するが, 本報ではすべて同一条件とした。切削中にワーク温度が低下しないよう, Fig. 2 に示すような試作したセラミックヒーター内蔵の保温チャックを用いた。オースカッティング終了後 Photo. 1 に示した装置上にワークをセットし, 空中放冷状態で外径部における温度及び寸法の変化量を計測した。ワークの支持部には耐熱性のエポキシ樹脂積層板を使用し, 部分的にワークが冷却されるのを防いだ。温度測定は接触式表面温度計を用いて行い, 寸法変化はダイヤルゲージの指示の変化を写真撮影して読み取った。

2.2 実験結果

Fig. 3 に加熱温度 850°C から M_s 点直上まで急冷し, オースカッティングを実施した後のワーク温度-寸法変化曲線を示す。オースカッティング終了直後のワーク温度は約 220°C であり, 加工中 (ワークを油中から取り出してから加工完了までの時間は約 3 min である) の温度低下はなかつた。これは保温チャックの爪部温度を約 220°C に制御して用いた効果であり, ワークとチャック間の熱移動がない場合は, 切削により加わる熱量と空中への放熱量がほぼ等しくなっていると考えられる。切削加工後の外径寸法は 135.5 mm であり, ワークの冷却に伴い約 170°C までは一定の割合で寸法が収縮しその後膨張している。加熱温度 850°C の場合はこの 170°C が M_s 点に相当すると考えられ, 170°C 以下室温まで冷却される間にマルテンサイト変態により体積膨張が起こり, 寸法は増大している。図中にワーク円周上

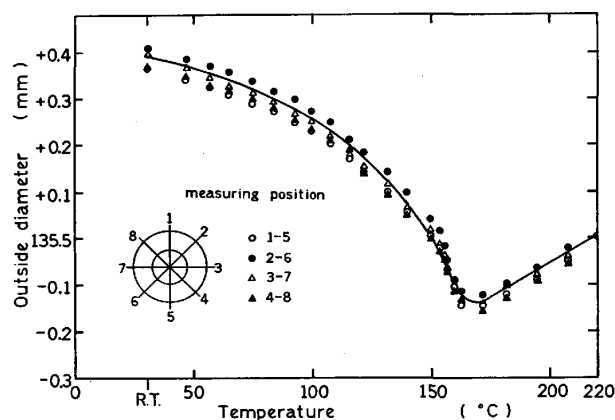


Fig. 3. Dimension change after auscutting at 220°C, quenched from 850°C.

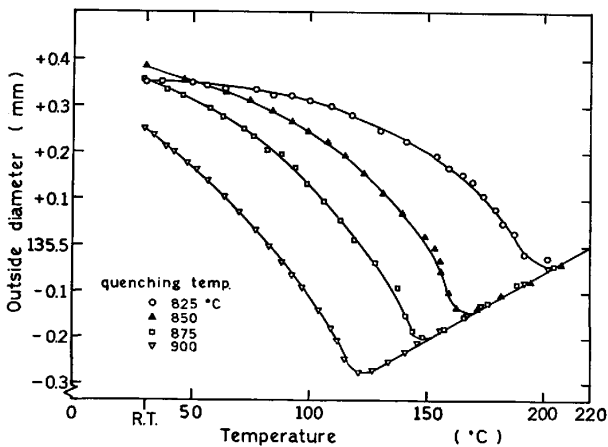


Fig. 4. Dimension change after auscutting in various quenching temperature from 825 to 900°C.

で 45° 間隔に分割した測定位置での寸法変化量を示したが、加工直後は真円であつたのに対し焼入硬化完了後では約 0.04 mm の焼入変形 (最大寸法-最小寸法) が認められる。

Fig. 4 は 45° 間隔での外径寸法測定値の平均値を求め、焼入加熱温度が 825°C~900°C と変化した場合の収縮から膨張への外径の変化を示す。焼入加熱温度が変化しても M_s 点までは一定の割合で収縮しており、同図より過冷オーステナイトの熱収縮率 ($\Delta l/l \cdot ^\circ C$) を読み取ると $2.2 \times 10^{-5}/^\circ C$ である。焼入加熱温度が 825°C, 850°C, 875°C, 900°C と上昇すると M_s 点はそれぞれ 200°C, 170°C, 145°C, 120°C と低下し、最終仕上がり寸法にも多少の差が認められる。最終仕上がり寸法は加熱温度 850°C の場合が +0.39 mm と最大で、加熱温度 900°C の場合が +0.25 mm と最小になっているものの、加熱温度 825°C, 850°C, 875°C の値を比較するとその差はわずか 0.03 mm であり軸受鋼の実用焼入加熱温度範囲 (800°C~850°C) では多少焼入加熱温度が変化してもほぼ一定値になると考えられる。従つて実用上、最終仕上がり寸法 (L) は、Fig. 4 より切削寸法 (l) と切削開始時のワーク温度 (T) を用いて(1)式のように表すことができるので、切削条件を一定とし、切削開始時のワーク温度を一定に管理すれば最終仕上がり寸法を一定にすることができると考えられる。

$$L = l(1.0077 - 2.2 \times 10^{-5} \times T) \dots\dots\dots (1)$$

軸受鋼は焼入れ後通常 150°C~180°C の焼もどしを実施するが、焼もどしの際にも組織変化に伴う寸法変化(収縮)が起こる。焼もどしによる収縮量は焼入れによる寸法変化量に比べてはるかに小さい(例えば 180°C×2h の条件では寸法収縮率 $\Delta l/l = 3.0 \times 10^{-4}$) が、研削代を厳密に管理する場合はその収縮量を考慮に入れた寸法を

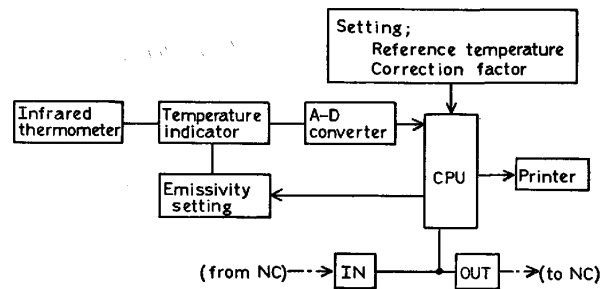


Fig. 5. Dimension control system.

最終仕上がり寸法として設定すればよいと考えられる。

3. 寸法制御実験

3.1 寸法制御方法

切削開始時のワーク温度は、実際の製造ライン工程においては焼入作業による冷却条件の変動あるいはワーク搬送中の温度低下等の要因により 20°C~30°C 変動することが考えられる。そこで切削開始時のワーク温度が多少変化しても所要の仕上がり寸法になるように制御する方法を考案し、オースカッピングにおける寸法制御を試みた。すなわち、切削開始時のワーク温度を計測し、基準温度(オースカッピングを実施するのに最適なワーク温度を基準温度とする)に対する温度差を工具位置の補正量として寸法変化量に演算補正をして切削加工を実施する方法である。

Fig. 5 に寸法制御システムの構成概要を示す。ワークの表面温度を非接触で計測できる赤外線温度計と、温度測定値をある設定された基準温度と比較してその温度差を寸法に演算変換して NC 旋盤の各工具位置補正部へ伝達する中央情報処理部 (CPU) とから成っている。CPU への設定入力としては基準温度と補正係数があり、補正係数はワーク各部の切削寸法に前章の実験により求めた過冷オーステナイトの熱収縮率 2.2×10^{-5} を乗じた値を用いる。

本寸法制御方法はオースカッピングに特有の、ワーク温度が高いために生ずる加工時のワーク温度の変動を補正するものであり、工具摩耗により生ずる切削寸法の変化に対しては補正を行っていない。工具摩耗に関する補正手段は別途検討することとし、本研究では切削終了後のワーク温度を計測することにより工具摩耗が仕上がり寸法精度に及ぼす影響を調査した。

3.2 実験方法

3.2.1 試験片及び熱処理条件

試験片として寸法変化量の測定実験で使用したものと同一の 6320 内輪軸受素材ワーク (SUJ3) を用いた。熱処理条件としては、電気炉中で 850°C×50 min 保持し

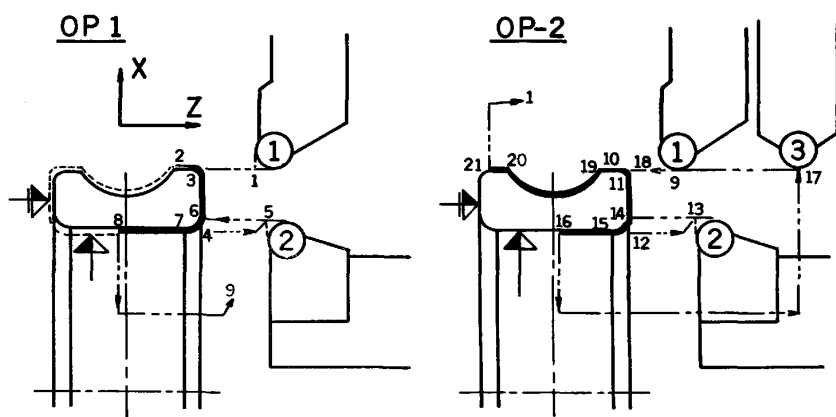


Fig. 6. Process drawing for cutting operation.

た後油中に急速冷却を行つた。温度補正の効果を明確にする目的で、切削開始温度が大きく変化するように焼入油温度と保持時間はワーク No. 1, No. 2 は 200°C × 3.5 min, No. 3, No. 4 は 180°C × 4 min, No. 5 ~ No. 14 は 180°C × 3.5 min と変化させた。

3.2.2 切削条件

切削条件を以下に示す。また切削加工工程図を Fig. 6 に示す。

切削速度 : $V=200$ m/min

送り量 : $f=0.2$ mm/rev

切り込み量 : $t=1.5$ mm (ローリング鍛造ワークを1回削りで所要寸法に仕上げる)

工具 : 黒セラミック工具 (直径 12.7 mm の丸型) 前すくい角 (α°)

① $\alpha = -6^\circ$ (幅切削工具)

② $\alpha = -9^\circ$ (内径切削工具)

③ $\alpha = -8.5^\circ$ (外径切削工具)

切削状態 : 乾式切削

なお、工具として黒セラミック工具を選んだ理由は、過冷オーステナイトは硬度が HB 230 程度と比較的低いにもかかわらず切削時の刃先温度が高温となるため、超硬工具では工具摩耗が著しく短寿命であり、オースカッピング用工具として黒セラミック工具が最適であったりからである。

3.2.3 設定値

寸法制御システムへの設定入力として本実験では次のようにした。オースカッピング時の最適ワーク温度範囲は加熱温度 850°C の場合、 M_s 点直上の 170°C ~ 230°C であるのでその中間の 200°C を基準温度とした。

基準温度 : 200°C

各工具の補正 : $G_1=3.0$ (工具①の X に対応)

係数 (G) $G_2=2.2$ (工具②の X に対応)

$G_3=3.0$ (工具③の X に対応)

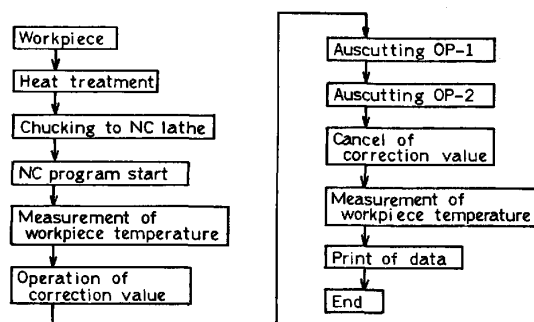


Fig. 7. Experimental procedure for dimension control.

$G_4=1.1$ (工具①, ②, ③の Z に対応)

赤外線温度計 : $\epsilon_1=0.93$ (切削前の黒皮状態)

の放射率 (ϵ) $\epsilon_2=0.45$ (オースカッピング後の切削面)

補正係数 G は切削各部の寸法に過冷オーステナイトの熱収縮率を乗じて求めたものであり、例えば外径部切削の場合は $135.5 \times 2.2 \times 10^{-5} = 3.0 \times 10^{-3}$ となり $G_3=3.0$ は 1°C の温度変化に対して 3.0 μ m の工具位置補正を行うことを意味する。赤外線温度計の放射率 ϵ は切削加工前後の表面状態の差異によつて異なり、それぞれ熱電対式の表面温度計を用いて実験により決定した。

3.2.4 実験手順

寸法制御実験の手順を Fig. 7 に示す。ワーク個数は 14 個 (No. 1 ~ No. 14) とし、同一切削条件にて行つた。寸法制御は個々のワークに対して単独に行い、演算された補正值はそのつどキャンセルされる。データとして切削開始前及び切削終了後のワーク温度を印字する。切削終了後直ちにワークの切削寸法を計測し、室温まで完全に空冷した後再び寸法計測を行う。

3.3 実験結果

Fig. 8 に寸法測定結果とオースカッピング開始時及び終了時のワーク温度を示した。寸法測定は外径及び

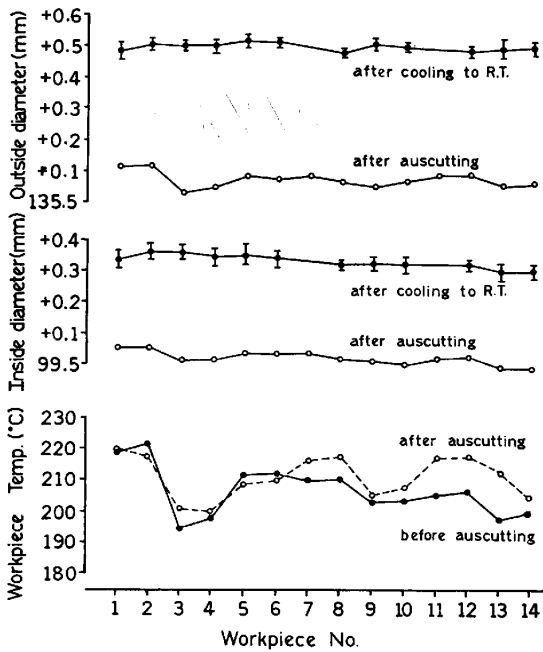


Fig. 8. Relationship between dimension and workpiece temperature.

内径について行い、図中○印はオースカッティング終了直後の切削寸法を、●印は室温まで空冷し焼入硬化が終了(硬度: HRC 64.5~65)した後の寸法を示す。また I 印で示した幅は焼入変形を表している。

オースカッティング終了後室温まで空冷した後の最終仕上がり寸法は外径及び内径ともに 0.05 mm 以内の変動範囲におさまっており、切削開始時のワーク温度が 30 °C 程度変動しても本法による寸法制御の効果により、従来工程での切削寸法公差 (±0.07 mm) 内におさめることができる。焼入変形に関してもほぼ 0.05 mm 以下であり切削を伴わない従来の焼入硬化熱処理品(通常 0.1~0.15 mm の焼入変形がある)に比べて著しく小さくなっている。一方、切削終了後のワーク温度に関しては、工具摩耗が少ない間は切削開始時とほとんど同じ温度を示しているが 7 個目の切削あたりからしだいに温度が 5°C~10°C 程度高くなり始め、工具摩耗による影響が認められるようになる。

4. 考 察

4.1 仕上がり寸法精度に及ぼす工具摩耗の影響

4.1.1 工具摩耗が少ない場合

14 個のワークにつき寸法制御実験を行つた結果、最終仕上がり寸法の変動は 0.05 mm 以内におさまっており、切削開始時のワーク温度の変動を補正するという制御方式だけで十分所要の寸法精度(目標値は従来方法での切削品の寸法公差内で ±0.07 mm)が得られた。14 個切削終了後の工具摩耗は逃げ面摩耗幅 (V_B) で表す

Table 2. Comparison of final dimension between measured and calculated value.

| Work-piece No. | Workpiece temp. (°C) | Machining dimension (mm) | Final dimension (mm) | | |
|----------------|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------|-------------|
| | | | Calculated D_c | Measured D_m | $D_m - D_c$ |
| 2 | 222 | O. 135.62 | 136.00 | 136.01 | +0.01 |
| | | I. 99.55 | 99.83 | 99.86 | +0.03 |
| 4 | 198 | O. 135.55 | 136.00 | 136.00 | 0 |
| | | I. 99.51 | 99.84 | 99.84 | 0 |
| 6 | 212 | O. 135.58 | 135.99 | 136.02 | +0.03 |
| | | I. 99.53 | 99.83 | 99.83 | 0 |

O. outside diameter I. inside diameter

と、外径工具: $V_B=0.05$ mm, 内径工具: $V_B=0.1$ mm と比較的小さく、工具摩耗が少ない場合には本研究で実施した寸法制御方式で、切削開始時のワーク温度が変化しても実用上十分な寸法精度が得られる。

切削開始時のワーク温度の変動が大きいワーク No. 2, No. 4, No. 6 について最終仕上がり寸法と実験で求めた(1)式での計算値を比較すると Table 2 のようになる。外径寸法及び内径寸法共に実測値と計算値とは良く一致しており、(1)式の妥当性が証明できたと同時に、(1)式を用いれば所要の最終仕上がり寸法に対してオースカッティングにおける切削開始温度と切削寸法を計算により決定できることになる。

また、焼入硬化熱処理に特有の焼入変形に関してもほぼ 0.05 mm 以内におさまっており従来工程での焼入品よりも寸法精度が向上している。これは、オースカッティングにおいては焼入加熱時の変形及び焼入冷却時の変形がすべて切削加工により除去されるためであり、研削代を削減することが可能となる。具体的には、従来研削代を 0.4 mm 程度見込まざるを得なかつたのに対し、本制御方式によるオースカッティングを実施することにより 0.2 mm 程度に削減でき、研削能率が向上した。

4.1.2 工具摩耗が多い場合

工具摩耗が多くなつた場合の寸法制御状況を調べる目的で、前述の制御実験(ワーク No. 1~No. 14)にひきつづき、同一制御方式、同一切削条件で工具交換をせずにワーク No. 15~No. 43 につきオースカッティングを実施した。焼入冷却条件は油温度 180°C で 3.5 min 保持とした。

Fig. 9 に外径及び内径の最終仕上がり寸法の変化、工具摩耗量の変化及びワークの温度上昇量(切削終了温度-切削開始温度)の変化をまとめて示した。外径寸法、内径寸法共に最終仕上がり寸法は加工個数の増大に伴い小さくなる傾向が認められる。No. 1 から No. 43 までの変化量は同図から外径寸法で -0.06 mm, 内径寸法で -0.18 mm あり、外径寸法に関しては工具摩耗が進行

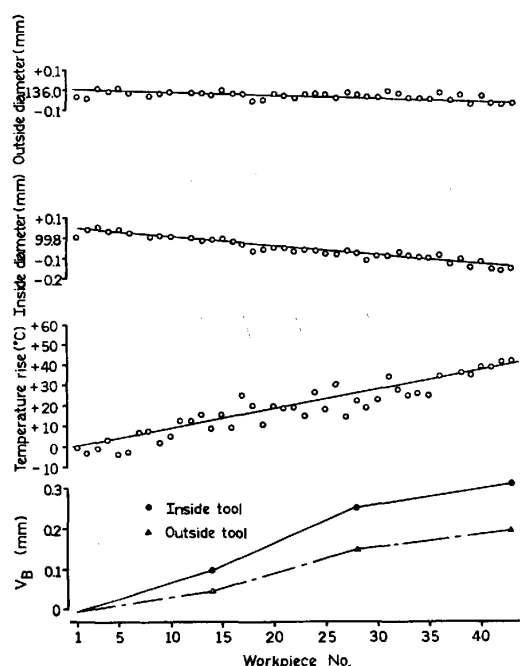


Fig. 9. Effect of tool wear on final dimension and temperature rise of workpiece.

してもその影響は小さく、本研究で試作した寸法制御システムを用いた制御方式で十分所要の寸法公差内におさまっている。一方内径寸法に関しては所要の寸法公差内におさまらず、工具摩耗量を何らかの手段でさらに補正をする必要がある。この現象は次のように解釈できる。

工具摩耗量は 43 個の切削終了後で外径工具、内径工具それぞれ $V_B=0.2$ mm, $V_B=0.3$ mm であり切削寸法に対する影響は、

$$\text{外径: } V_B \times \tan \alpha^\circ \times 2 = 0.2 \times \tan 8.5^\circ \times 2 \approx 0.06 \text{ mm} \quad \oplus$$

$$\text{内径: } V_B \times \tan \alpha^\circ \times 2 = 0.3 \times \tan 9^\circ \times 2 \approx 0.10 \text{ mm} \quad \ominus$$

あつたと考えられる。

一方同図中に示したように工具摩耗量の増加に伴い、切削による温度上昇量が増大し、43 個切削終了後では約 40°C になつている。この温度上昇量の寸法に対する影響は、

$$\text{外径: } 135.5 \times 2.2 \times 10^{-5} \times 40 \approx 0.12 \text{ mm} \quad \ominus$$

$$\text{内径: } 99.5 \times 2.2 \times 10^{-5} \times 40 \approx 0.09 \text{ mm} \quad \ominus$$

あつたと考えられる。

以上最終仕上がり寸法には刃先摩耗の影響及び温度上昇の影響の両方が現れてくるため、43 個目のワークは 1 個目のワークと比較して

$$\text{外径: } +0.06 - 0.12 = -0.06 \text{ mm}$$

$$\text{内径: } -0.10 - 0.09 = -0.19 \text{ mm}$$

の影響があると考えられ、実測値と良く一致する。

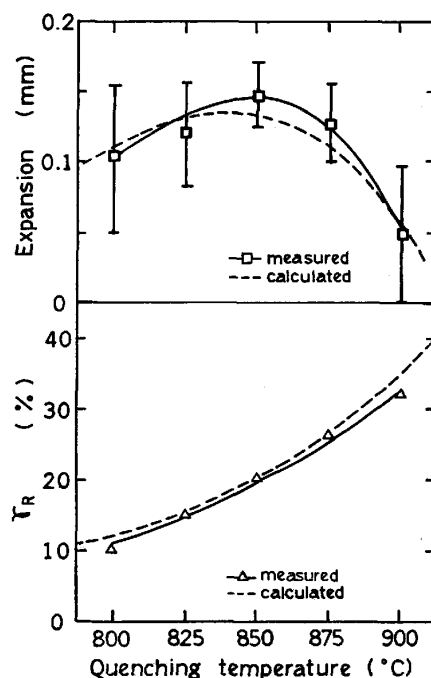


Fig. 10. Effect of quenching temperature on dimension change and retained austenite (γ_R).

工具摩耗が多くなつた場合の寸法補正手段としては、通常の切削方法において用いられているような工具位置を種々の検出器により検出して摩耗量を補正することも有効であるが、オースカッティングにおいては Fig. 9 中に示したように工具摩耗量と切削によるワークの温度上昇量にはほぼ比例関係が認められることより、ワークの温度上昇量を検出することにより工具摩耗量を推定する方法が有効であると考えられる。

4.2 焼入加熱温度の寸法変化に及ぼす影響

Fig. 4 に示したように一定温度で切削加工した場合でも、焼入加熱温度が変化すればマルテンサイト変態終了後の最終仕上がり寸法には多少の差が認められた。この現象は残留オーステナイト (γ_R) 量と関係があると考えられ、別形状の試験片を用い焼入硬化熱処理による寸法変化量と γ_R 量の関係を調べ、焼入加熱温度の寸法変化に及ぼす影響を考察した。

前述の軸受素材 (SUJ3) から外径 120 mm, 内径 100 mm, 幅 20 mm のリング形状試片を作製し、焼入硬化熱処理 (熱処理方法はオースカッティングを実施する場合と同じ) における外径寸法の変化量及び γ_R 量を測定した。 γ_R 量は X 線により測定し、 $\gamma(220)$, $\alpha(211)$ 面の回折強度から求めた。

Fig. 10 に焼入加熱温度が 800°C~900°C と変化した場合の寸法変化量 (膨張量) 及び γ_R 量の測定結果を示した。寸法変化量に関しては焼入変形が大きい、平均値で比較すると加熱温度 850°C の場合に寸法膨張量が

最も大きく極大を示し、850°Cよりも低くても高くても寸法膨張量は小さくなっている。一方、 γ_R 量は焼入加熱温度の上昇に伴い多くなっている。

軸受鋼の焼入組織はマルテンサイト+ γ_R +未溶解炭化物の混合組織であり基質中に固溶する炭素量は焼入加熱温度により異なる。佐藤らによればCr3%以下、Mn3%以下の鋼では炭化物は $(Fe \cdot M)_3C$ となり²⁾炭素鋼の場合と大差ないと考えられるので、以下炭素鋼における計算式を用いて考察する。

オーステナイトあるいはマルテンサイトに固溶している炭素の重量パーセント(%C)は鋼の炭素重量パーセントを $\%C_T$ 、セメンタイトの容量パーセントを V_c とすれば(2)式の関係で表される³⁾。

$$\%C = \frac{\%C_T - 0.067V_c}{1 - 0.01V_c} \dots\dots\dots (2)$$

焼入れ後の組織観察の結果、残留炭化物量は825°C、900°C、925°C加熱時においてそれぞれ約7.5%、2%、0%であった。本実験に用いた試験片の $\%C_T$ は1.02であり、(2)式を用いて基質中に固溶している $\%C$ を計算し焼入加熱温度(T_q)との関係を求めると、両者にはほぼ比例関係が認められ(3)式のように表すことができる。

$$\%C = 0.0046T_q - 3.235 \dots\dots\dots (3)$$

KOISTINENによれば炭素及び低合金鋼の焼入れの場合、室温20°Cにおける γ_R 量(%)はその材料の M_s 点に依存し、(4)式で表される⁴⁾。 M_s 点はFig. 4の実験結果より焼入温度の関数として(5)式で表されるので γ_R 量も(6)式のように焼入加熱温度の関数として表せる。

$$\gamma_R = \exp[-0.011(M_s - 20)] \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

$$M_s = -T_q + 1020 \dots\dots\dots (5)$$

$$\gamma_R = \exp[-0.011(1000 - T_q)] \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

(6)式を用いて $T_q = 800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ の温度範囲で γ_R 量を計算した結果をFig. 10中に示したが、本実験での実測値とよく一致している。

焼入れ時の組織変化に伴う体積変化はLEMENTによれば、(フェライト+セメンタイト)→マルテンサイト、(フェライト+セメンタイト)→オーステナイトに変化した時の体積変化量(%)はそれぞれ固溶している炭素量の関数として(7)、(8)式のように表される⁵⁾。

$$\Delta V_m = 1.69(\%C) \dots\dots\dots (7)$$

$$\Delta V_\gamma = -4.64 + 2.21(\%C) \dots\dots\dots (8)$$

従つて、焼入れ後の体積変化量 ΔV は(9)式で表されることになり、寸法変化量 Δl は焼入れ前の試片寸法を l とすると(10)式で表される。

$$\Delta V = \Delta V_m(100 - \gamma_R) + \Delta V_\gamma \times \gamma_R \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta l = l \times \Delta V / 3 \dots\dots\dots (10)$$

(10)式に(3)(6)(7)(8)(9)式を代入すると寸法変化量は焼入加熱温度の関数として求まり、 $l = 120 \text{ mm}$ の場合の計算結果をFig. 10中に示した。寸法膨張量は加熱温度840°Cの場合に0.14mmと極大を示し、また840°C近辺の温度域では加熱温度が多少変化しても寸法変化量の差は小さく、本実験結果とほぼ一致している。焼入加熱温度が高くなるとマルテンサイト変態による膨張が大きくなると同時に γ_R 量も多くなり、寸法変化としては両者が相殺されるため、実用焼入加熱温度範囲では焼入加熱温度の寸法変化に及ぼす影響は小さくなると考えられる。

5. 結 言

焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態で切削加工を施すオースカッティングにおいて、切削加工終了後の寸法変化挙動を定量的に明らかにした。またその結果得られた過冷オーステナイトの熱収縮率に基づき、切削開始時のワーク温度が変化した場合でも最終仕上がり寸法を精度良く一定寸法に制御する寸法制御方法を考案し、実験によりその効果を確かめた。

得られたおもな結果は次のとおりである。

- 1) SUJ3における焼入冷却途中の過冷オーステナイトの熱収縮率は $2.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ である。
- 2) 焼入加熱温度が変化すると M_s 点も変化し、最終仕上がり寸法も多少変化する。最終仕上がり寸法はマルテンサイトの体積膨張量と残留オーステナイト量との関係により決まり、加熱温度840°C~850°Cの場合が最大寸法となる。しかしながら軸受鋼の実用焼入加熱温度範囲においてはその差はわずかであり、ほぼ一定値になると考えてもさしつかえない。従つて、最終仕上がり寸法(L)は切削寸法(l)と切削開始時のワーク温度(T)を用いて次式のように表すことができる。

$$L = l(1.0077 - 2.2 \times 10^{-5} \times T)$$

- 3) 工具摩耗量が少ない場合は、ワークの切削開始時の温度変動を過冷オーステナイトの熱収縮率に基づいて切削寸法を補正するという寸法制御方法を用いることにより、ワーク温度の変動が30°C程度あつた場合でも最終仕上がり寸法を十分良好な精度に制御できる。また焼入変形も著しく小さくなるので、研削代を従来の製造工程品の約1/2に削減することが可能となる。

- 4) 工具摩耗量が多くなつた場合には、刃先位置の変化及び切削加工によるワークの温度上昇が発生するため十分な精度が得られず、別途工具摩耗量の補正が必要と

なる。工具摩耗量を検出する手段としては、ワークの温度上昇量を計測するのが有効である。

最後に本研究は昭和 56 年度通産省重要技術研究開発試験研究の一つとして助成を受けたことを付記する。

文 献

- 1) Y. FUJIOKA, H. TANI, and H. MURO: Proc. Intern'l Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel (1977), p. 323 [ISIJ].
- 2) 佐藤知雄, 西澤泰二: 日本金属学会誌, 19(1955), p. 385
- 3) 田中実: 鉄鋼材料便覧 (日本金属学会, 日本鉄鋼協会編) (1979), p. 122 [丸善]
- 4) D. P. KOISTINEN and R. E. MARBURGER: Acta Metall., 7 (1959), p. 59
- 5) B. S. LEMENT: Distortion in Tool Steels (1956) [ASM]