

研削層におけるかたさの変化と残留応力について

能登谷久公, 山田 茂, 高辻 雄三, 大山 達雄

1. 緒 言

機械加工等によって、焼きなまし材においてはその表面が加工ひずみを受けて硬化し、熱処理硬化した材料では加工層の一部に軟化する部分が生じることが知られている。また先に報告した熱処理鋼の研削による研削層の残留応力を求めた際に薄層除去を行いながら残留応力の測定と微小かたさの測定⁽¹⁾を併せて行なった。このとき研削層においてかたさが細かく変化することが知られた。

本研究では焼入れ焼戻しかたさの異なる数種の鋼について、かたさとX線半価幅の対応関係を調べた。ついで研削層におけるかたさとX線半価幅、かたさと組織の関係について対比検討を行なった。さらに、研削層の各深さに生じる残留応力とそれぞれの位置におけるかたさの測定を行ない、残留応力とかたさとの対応関係について検討した。

2. 実験方法

本実験に用いられた試料はさきと同様の S45C, SCM 4, SNCM 8, SK 3, SUJ 3 および SKS 2 の 6 種類の市販の丸材である。これら各鋼の化学成分は Table 1 に示すごとくで、直径 50~70mm の丸材を鍛造し、60mm×8mm×15mm の大きさに機械仕上げを行なった。熱処理は各試料ともソルトバスで 1123K, 1.7ks (850°C, 30min.) に加熱保持して油中焼入れを行ない、ついで各種の温度で焼戻しを行なった。このとき研削用試料は炭素量 0.4% 程度のグループ(A)の S45C, SCM 4, SNCM 8 では、かたさを HRC50, 40, 30 に選び、炭素量 1% 程度のグループ(B)の SK 3, SUJ 3, SKS 2 は、かたさを HRC 60, 50, 40 に選んだ。また、かたさと X 線回折プロファイル半価幅 (以後 X 線半価幅という) の関係を調べる試料については 473K からは 50K 間隔で焼戻し温度を変えて 1.8ks (30min.) の間ソルトバス中に保持し、空冷したものである。

これらの温度で焼戻した試料の一面について電解研磨と水研磨によって表面下 1mm 程度除去して熱処理による脱炭の影響を少なくするようにした。この研磨面について X 線残留応力⁽²⁾を測定する要領で X 線入射角を 4 方向にとり、この回折プロファイルの半価幅の平均値を求めた。X 線照射条件は Table 2 に示す如くである。

Table 1 各鋼の化学成分

Group	Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	W	V
A	S 45 C	0.45	0.30	0.60	0.03	0.03	0.20	0.30	0.20	—	—	—
	SCM 4	0.40	0.27	0.66	0.008	0.011	0.97	0.08	0.04	0.18	—	—
	SNCM 8	0.40	0.24	0.74	0.012	0.022	0.74	0.08	1.71	0.17	—	—
B	SK 3	1.05	0.28	0.32	0.012	0.013	0.11	0.06	0.04	—	—	—
	SUJ 3	1.08	0.46	0.96	0.017	0.011	1.03	0.04	0.06	0.03	—	—
	SKS 2	1.05	0.26	0.79	0.024	0.015	0.77	0.09	0.06	—	1.34	0.04

Table 2 X線照射条件

Target, Filter	Cr K α , V
Voltage, Current	30 kV, 10mA
Scanning Speed	1.16 $\times 10^{-3}$ rad/s
Count Full Scale	125 c/s
Time Constant	2 s
Divergence Silt	2.9 $\times 10^{-3}$ rad
Receiving Silt	0.3 mm
Chart Speed	6.67 $\times 10^{-7}$ m/s
ψ	10°, 20°, 30°, 40°

また、この面の全面にわたり微小硬度計で7点の硬度を測定し、その平均値をとった。このとき研磨による表面の擾乱の影響を少なくするため測定荷重を100grと比較的大きい荷重を用いた。また、所定の条件で研削したのについて電解研磨で表面から所定量ずつ除去するごとに半価幅の変化を調べ、つぎにEPMAによるSEM像を写真撮影し、その後、水研磨法で軽く表面を研磨して微小かたさの測定を行なった。これを順次繰り返しながら研削表面から内部までのかたさ、組織およびX線半価幅の測定を行なった。

3. 結果と検討

これらの試料についての焼戻しかたさとX線半価幅の測定を行なった。結果の一部はFig.1からFig.4までに示した如くである。なお、S45CとSCM4、SK3とSUJ3ではTable 1にみられる如く、成分的な違いはクロム量で、その他の成分には大きな違いのみられないものである。

S45CおよびSCM4では焼入れかたさが640Hv前後で、X線半価幅が5.6度程度であり、焼戻し温度の上昇に伴って次第に低下している。

一方、SK3およびSUJ3のものではかたさが820Hvから870Hvと大きい。しかし、X線半価幅はSK3のものはS45CやSCM4とほぼ同程度であるが、SUJ3では、7.6度前後とかなり大きい。

以上の結果をかたさとX線半価幅の关系到りてFig.5

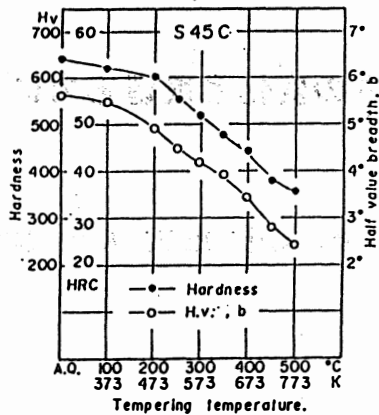


Fig. 1 S45Cの焼戻しによるかたさとX線半価幅

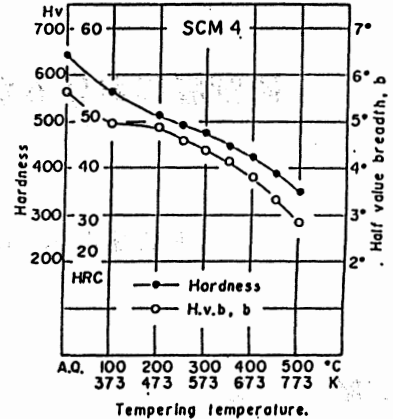


Fig. 2 SCM4の焼戻しによるかたさとX線半価幅

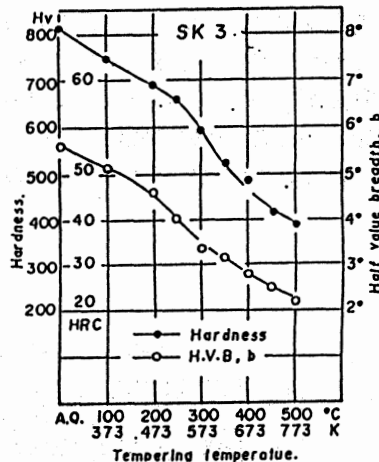


Fig. 3 SK3の焼戻しによるかたさとX線半価幅

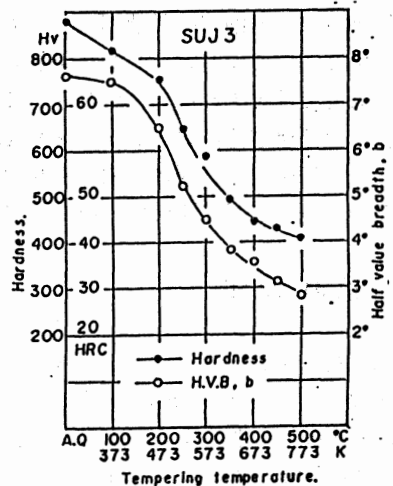


Fig. 4 SUJ3の焼戻しによるかたさとX線半価幅

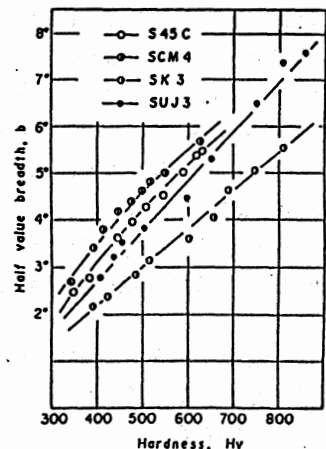


Fig. 5 各鋼の焼戻しかたさとX線半価幅の関係

に示した。同図によれば、鋼種によって多少異なるが、かたさとX線半価幅は良好な対応関係を示している。また、炭素量が同程度であれば合金成分が含まれるものの方がX線半価幅が大となることが示される。

以上のことから熱処理硬化材は焼戻しに伴う変態過程の進行によって、その内部ひずみが、減少することが知られた。次にこのような熱処理材の研削層におけるかたさ並びにX線半価幅について検討を行なうものである。

Fig. 6~Fig. 8にSCM 4, SUJ 3およびSKS 2の各かたさの試料の研削層におけるX線半価幅とかたさの関係を示したが、いずれのかたさのものも表面よりやや内部でかたさが低下し、これが最表面で再び硬化しているのがみられる。これらは研削熱によって焼戻され軟化した部分が、高速回転する砥石の周囲に発生する空気層の連れ回り流れによる一種の空冷効果によるものである⁽⁵⁾。

また表面の再硬化した部分が内部のかたさ、即ち試料かたさを超えているものもみられる。さらに、試料かたさの大きいものほど研削層におけるかたさの低下が大きいことが知られる。X線半価幅は試料かたさの大きい試料の研削層では、硬度低下の著しいところで一旦これが低下し、表面へむかって増加を示している。最表面のかたさは内部のかたさに回復しているようであるが、X線半価幅は内部よりやや小となっている。これは研削熱による焼戻し軟化に伴う半価幅の低下と、再硬化によるひずみの発生でX線半価幅も増加するものである。最表面でかたさの割に半価幅が小さいのは硬化層が薄い再硬化に伴う組織のひずみの一部が開放されやすいことによるものと考えられる。

かたさが小なるものでは研削層におけるかたさの変化は少なく、再硬化も少ないようである。しかし、X線半価幅についてみると内部より表面の方が大となっており、かたさの大なる試料の場合とは異なったものとなっている。

以前に報告した炭素鋼焼なまし材の場合に研削層のX線半価幅が内部のものより大となりその際、表面層に塑性ひずみと加工硬化を生じることが示された。

本実験の場合も硬度の低い試料は組織的にはトルースタイトまたはトルースタイトとソルバイトの混合組織と考えられ、焼戻しによる再硬化の影響は比較的少ない。従ってこの場合には加工硬化の影響を受けて表面層のX線半価幅が大となることが考えられる。

かたさの異なる試料の研削層の各深さにおける組織とその位置におけるかたさとの対比を行なった。これらの組織は研削面から内部へむかって所定の深さを電解研磨法によって除去し、X線半価幅の測

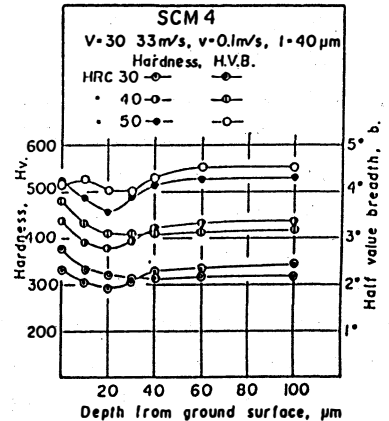


Fig. 6 SCMの研削層におけるかたさとX線半価幅の関係

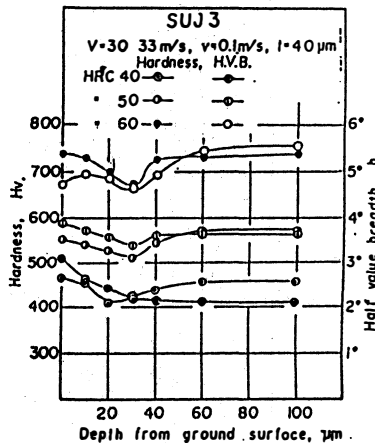


Fig. 7 SUJ3の研削層におけるかたさとX線半価幅の関係

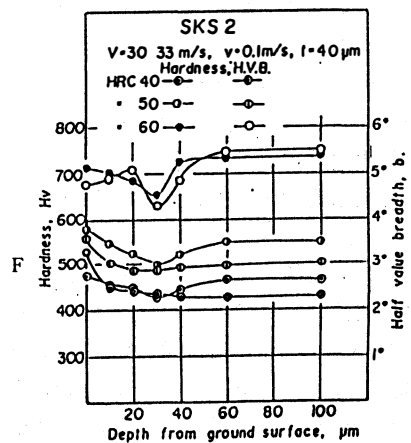


Fig. 8 SKS2の研削層におけるかたさとX線半価幅の関係

定を行ない、ついでこの面を軽く水研磨して微小硬度を測定し、さらにこの面を5%ピクラール液にてエッチングを行なってEPMAによるSEM像を撮影したものである。結果の一部であるSUJ3の場合はFig.9に示すように、高かたさの部分ではマルテンサイトのはっきりした組織がみられるが、かたさの低下した部分では組織が乱れた状態となっている。表面に近い再硬化した部分にもマルテンサイト組織がみられる。

これまで述べてきた研削層におけるかたさの変化と研削層における残留応力との関係について考察するため、さきに報告した同一条件で研削を行ない、ひずみゲージ法を用い298K、15%の硝酸水溶液による逐次除去によって求めた残留応力と比較検討を行なうものとする。

これら各種の熱処理鋼の残留応力の分布曲線とここでみられた表面からのかたさの変化を対比させたものがFig.10およびFig.11である。残留応力分布をみると、試料かたさの大なるものは最大残留応力は大きい、引張応力層の深さは大きくないようである。

一方かたさの低いものではこの引張応力層の深さは大となり、研削加工層が大きくなる傾向がみられる。これに対して、試料かたさの大なるものでは研削層におけるかたさの低下は大きいとその低下している範囲はせまくなっており、残留応力の状態とよ

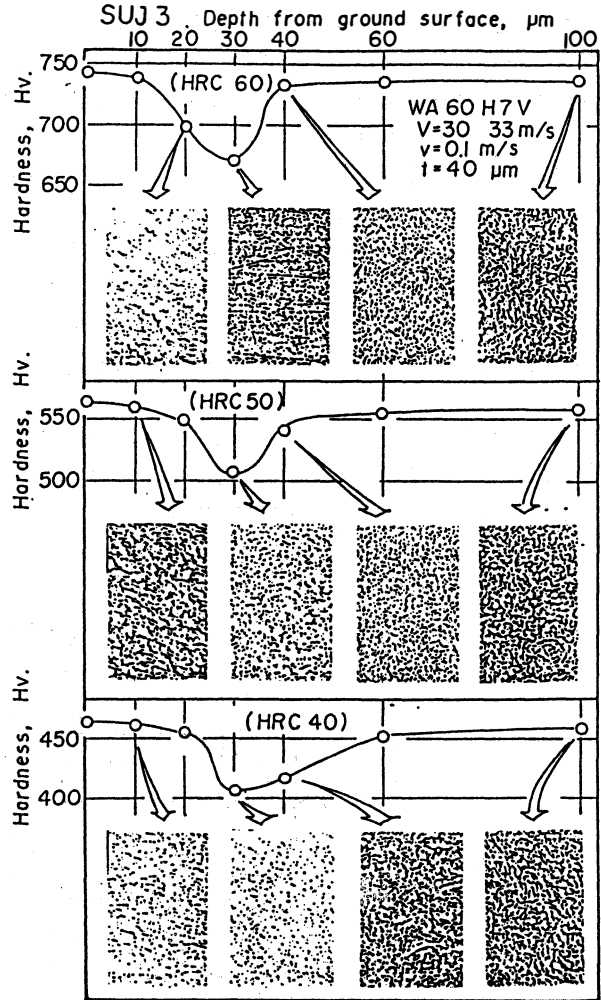


Fig. 9 研削層におけるかたさとSEM像の対応

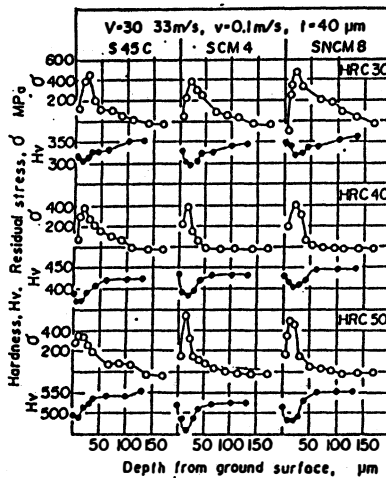


Fig. 10 研削残留応力分布とかたさの分布 (Aグループ)

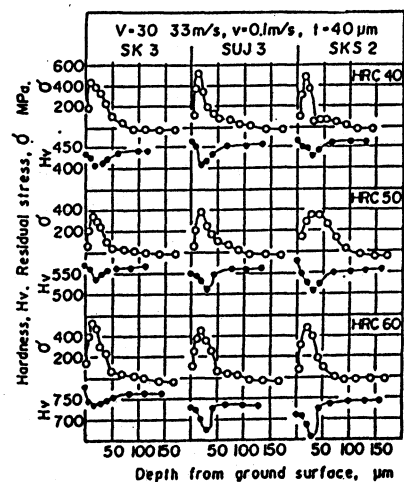


Fig. 11 研削残留応力分布とかたさの分布 (Bグループ)

く対応している。また硬度の低い試料ではやはり研削層のかたさの低下は少なく、この低下している範囲は逆に広くなり、この場合も残留応力の分布とよく対応しており、このような熱処理鋼におけるかたさの変化すなわちこの部分における比容積変化が大きく関与することが知られた。

4. 結 言

熱処理かたさの異なる数種の鋼のかたさとX線半価幅の対応関係を調べ、つぎに研削層の各深さにおけるかたさとX線半価幅の関係について求めた。さらに、研削層におけるかたさと組織について検討を加え、かたさとひずみゲージ法でもとめた研削残留応力の分布状態について対比検討を行なった結果、

- 1) 鋼種によって多少異なるが、焼入れ焼戻し熱処理鋼のかたさとX線半価幅は良好な対応状態を示している。
- 2) いずれの場合も研削層においてかたさの変化する部分があらわれ、このときX線半価幅も変化するが、この変化は必ずしもかたさの変化とは対応しない。
- 3) 研削層の残留応力分布とかたさの分布は比較的良好な対応関係を示し、研削層におけるかたさ即ち組織の違いは部分的な比容積変化を伴い、熱処理硬化鋼の場合これらが残留応力の発生に大きく関与することが知られた。

参 考 文 献

- 1) 米谷 茂，能登谷久公，高辻雄三：日本金属学会誌，**48**，661，(1984)。
- 2) 日本材料学会編：X線応力測定法，養賢堂（1969）。
- 3) 古市亮蔵，中山 守：機械学会関西支部講演会前刷，1-175（1964-3）。
- 4) 森永卓一，財満鎮雄：材料試験，**6**-303（1957）。
- 5) 高沢孝哉：砥粒加工技術便覧，日刊工業新聞社（1065）。

Influence of the Defference of Work Material Hardness on the Residual Stress in Groud Layers

Hisakimi NOTOYAMA, Shigeru YAMADA,
Yuzo TAKATUJII, Tatsuo OOOYAMA

It was known that the ground surface of annealed steel was hardened and some part of groud layer on heat hardend steel were soften by work strain respectively.

Correlation between this softening effect and residual stress in ground layer was not well developed.

In this work, correspondence of hardness to half value broad of X-ray for several kinds of steel treated of diffrent tempering temperatures was examined.

Relationship between hardness and half value broad of X-ray and structure of ground surface were discussed.

Furthermore, the residual stress and hardness depended on the depth from ground surface were measured.

It can be concluded that the hardenss below finished surface corresponded with its'half value broad of X-ray varied with the sort of steels, and the distribution of hardness and residual stress induced by grinding made a good agreement.

[英文和訳]

研削層におけるかたさの変化と残留応力について

能登谷久公, 山田 茂, 高辻 雄三, 大山 達雄

研削によって、焼なまし材はその表面が加工ひずみを受けて硬化し、熱処理硬化した材料では研層の一部に軟化する部分が生じることが知られている。この軟化層と残留応力との関係についてはまだ十分明らかにされていないようである。

本研究では、まず焼戻しかたさの異なる数種の鋼について、かたさとX線半価幅の対応関係について調べた。つぎに研削層におけるかたさとX線半価幅、かたさと組織の関係について検討を行なった。さらに研削層の各深さにおける残留応力とそれぞれの位置におけるかたさの対比を行なった。

その結果、鋼種によってそれぞれ異なるが、かたさとX線半価幅は良好な相関性を示しており、また研削による残留応力分布とかたさの変化がよく対応することが知られた。