

振り変形材における表面内部応力の加熱による 変化についてのX線的研究

上田 太郎*, 岩永 弘之

X-ray Investigation on the Change of Surface internal stress
depend on the Heating in Twisting work material.

by

Tarō UEDA, Hiroyuki IWANAGA

The change of microscopic surface internal stress depend on the passage of time and high vacuum annealing in Twisting work materials were studied by the X-ray.

The following results were obtained from the experiment.

- (1) Immediately load off, the round bar specimen which was subjected a twisting deformation have a compressive internal stress together with a Longitudinal direction or a Tangential direction in the surface of specimen.
- (2) The recovery of surface internal stress finished about 48 times, get to a stable condition together with a 0.2% carbon steel (S20C), or a high tensile aluminum alloy (17S) and a electrolytic copper (CuB-1).
- (3) In the neighbourhood of the recrystallization temperature of each materials, the surface internal stress and the value of half breadth were exhibited the heaty decrease. The surface internal stress point out a remarkable decrease, according to the twisting deformation become larger.
- (4) In a 0.2% carbon steel (S20C), (211) diffraction line tend to separate K_{α_1} and K_{α_2} at between 350°C and 450°C. In a high tensile aluminum alloy (17S), (333) diffraction line separate K_{α_1} and K_{α_2} at 250°C, it seems that the recrystallization occurring at these temperature.

1. 緒 言

金属が外力を受けて変形する時その外力の作用が金属の各部分において一様でないため外力の作用を除いた後においても金属の内部には変形度の相違より生じる内部応力が存在し、その釣合いのもとに平衡状態を保っている。一般に金属は大なる変形を受けた後、外力を取り除いても変形回復は直ちに完了するのではなく回復は徐々に進行して長時間経過した後、安定な状態に達するものである。

この種の研究⁽¹⁾について、上田博士は種々の物質よりなる直径 8 mm, 長さ 200mm の丸棒を振って永久変形させた後、時間の経過につれて振り角が回復するのを調べておられる。

これによると振れた方向と反対方向に棒が振れもどる角度は次第に大となり、一定値に近づく、またいずれの材料においても初めに与えた振り変形角が大きいほど振

り回復角は大であると報告している。

また低温加工された後、常温において内部応力が安定した状態の金属を加熱すると原子の熱的運動のため内部応力は減少し、かつひずみを受けた部分は温度上昇につれて、発熱現象、再結晶等を起こして内部応力は減少する⁽²⁾。上田博士の実験的研究によれば、振り永久変形を与えた棒を種々の温度の真空中で加熱すると振れが回復したり、進んだりすると報告し、この現象について、永久変形を受けた棒の横断面について考えると比較的内側には振れを回復させようとするせん断応力が作用し、比較的外側には振れを進めようとするせん断応力が作用していると説明している。

そこで本研究の目的として、振り変形を施した試験片の縦軸方向と接線方向との微視的な表面内部応力の時間経過によって起る変化常温において表面内部応力が安定な状態に達した後の高真空焼鈍温度上昇による表面内部応力の変化をX線により測定した、

* 大阪大学, 工学部名誉教授

2. 供試材および実験方法

実験に供した材料は0.2%炭素鋼(S20C)、高力アルミニウム合金(17S)と電気銅(CuB-1)で化学組成および0.2%炭素鋼の770°C、30分の焼鈍、また高力アルミニウム合金、電気銅の500°C、30分の焼鈍における機械的性質をそれぞれ、Table 1, Table 2に示す。

Table 1(a). Chemical composition of material.

Material	C	Mn	Si	P	S	Fe
S20C	0.18~0.23	0.30~0.60	0.15~0.35	<0.02	<0.02	Re.

Table 1(b).

Material	Fe	Cu	Mn	Mg	Si	Al
17S	1.0	4.0	0.5	0.3	0.8	Re.

Table 1(c).

Material	Cu	As	Sb	Bi	Pb	S	Fe
CuB-1	>99.96	<0.003	<0.005	<0.001	<0.005	<0.01	<0.01

Table 2. Mechanical Properties.

Materials	Tesile Strength	Yield Strength	Elongation
S20C	41kg/mm ²	25kg/mm ²	28%
17S	18.2kg/mm ²	7kg/mm ²	22%
CuB-1	23.1kg/mm ²	4kg/mm ²	55.1%

試験片は直径25mmの機械構造用炭素鋼(S20C)、直径18mmの高力アルミニウム合金(17S)、および電気銅(CuB-1)の棒材からFig. 1(a), Fig. 1(b)に示す形状寸法に機械加工し、その後ひずみ除去のため真空炉中において0.2%炭素鋼は770°Cで30分、高力アルミニウム合金と電気銅は500°Cで30分の焼鈍を施した。その後アムスラー式振り試験機により、0.1π/cm, 0.2π/cm, 0.3π/cm, 0.4π/cm, 0.5π/cmの振り変形を与え、試験片の縦軸方向と接続方向の表面内部応力が振り荷重除去後、時間の経過により変化する状況ならびに、常温において表面内部応力が安定した後、これの加熱による変化を調べるために島津製普及型X線応力測定装置を用いて測定した。

特に加熱による金属の挙動を知るために0.2C炭素鋼は100°Cから900°Cまで、高力アルミニウム合金は100°

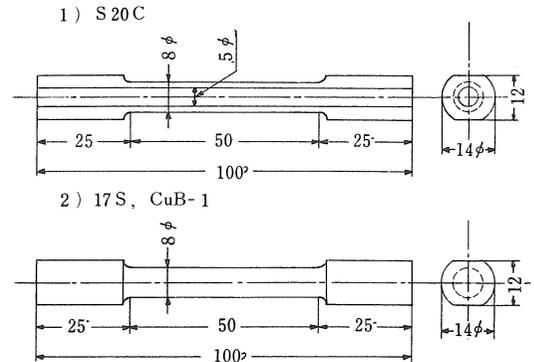


Fig. 1. Dimension of Specimens.

Cから500°Cまで、また電気銅は800°Cまで高真空炉中で加熱した後X線で測定した。さらに再結晶について調べるため、0.2%炭素鋼は350°C~500°C、高力アルミニウム合金は200°C~350°Cの再結晶温度範囲を50°C間隔で真空焼鈍し測定した。また電気銅は150°C~250°Cの再結晶温度範囲を25°C間隔で高真空焼鈍し測定した。

特性X線として0.2%炭素鋼はCr-Kα線を採用し、(211)面について、高力アルミニウム合金はCu-Kα線を採用して(333)面について、電気銅はCo-Kα線を採用し、(400)面について測定した。X線応力測定条件はTable 3に示し、さらにFig. 2にX線射方向と試験片軸を示す。

X線による応力の測定にはカウンター法を用い、カウンター法の定義式よりX線入射角を0°, 15°, 30°, 45°と変え、0.2%炭素鋼と高力アルミニウム合金は縦軸方向、電気銅の接続方向の回折線をゴニオメーターにより自動的にステップキャンさせ、2θ対sin²ψ線図に回折強度最大角をプロットし、勾配を決め応力を算出した。回折強度最大角の決定には半価幅法および1/4幅法を用いた。

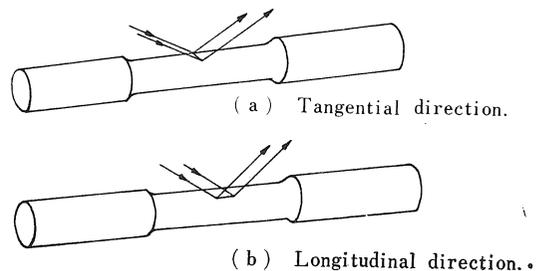


Fig. 2. Specimen axis and incident X-ray beam direction.

Table. 3. Experimental Condition of X-ray stress.

Measuring apparatus	Parallel beam type X-ray stress analyzer.		
Materials	S20C	17S	CuB-1
Characteristic X-ray	Cr-K _α	Cu-K _α	Co-K _α
Diffraction plane	(211)	(333)	(400)
Filter	V	Ni	Fe
Slit	Soller slit (2×10) mm ²	Soller slit (2×10) mm ²	Soller slit (0.5×5) mm ²
Tube Voltage	25KV	30KV	30KV
Tube Current	5mA	20mA	10mA
Time Constant	1 Sec.	5 Sec.	2 Sec.
Gonio Scan Speed	1°/min	1°/min	1°/min
Chart Full Scale	500 cps	200 cps	200 cps
Chart Speed	20mm/min	20mm/min	20mm/min
Count	G.M. count	G.M. count	G.M. count

3. 実験結果および考察

実験に供する前、0.2%炭素鋼は770°C、30分、高力アルミニウム合金は500°C、30分、および電気銅は500°C、30分のひずみ除去加熱を施した。これをゴニオメーターにより0.2%炭素鋼の(211)面、高力アルミニウム合金の(333)面、および電気銅の(400)面の回折線を連続走査させ、回折強度最大角を半価幅法および1/8幅法によって決定し、2θφ対sin²ψ線図に描いて見ると勾配が零であったため表面内部応力は零と見なすことが

でき、試験片の機械加工によるひずみは完全に除去されたと判断した。

かかる試験片に種々の振り変形を施したときの振りモーメント対振り角曲線、および、せん断応力対振り角線はFig. 3 (a), (b), (c)である。上記の振り変形を与えた直後、その表面内部応力を測定するためにX線応力回折法により回折強度最大角を半価幅法および1/8幅法で決定し、2θφ対sin²ψ線図に描き、これより求めた表面内部応力と振り角との関係を示すとFig. 4である。

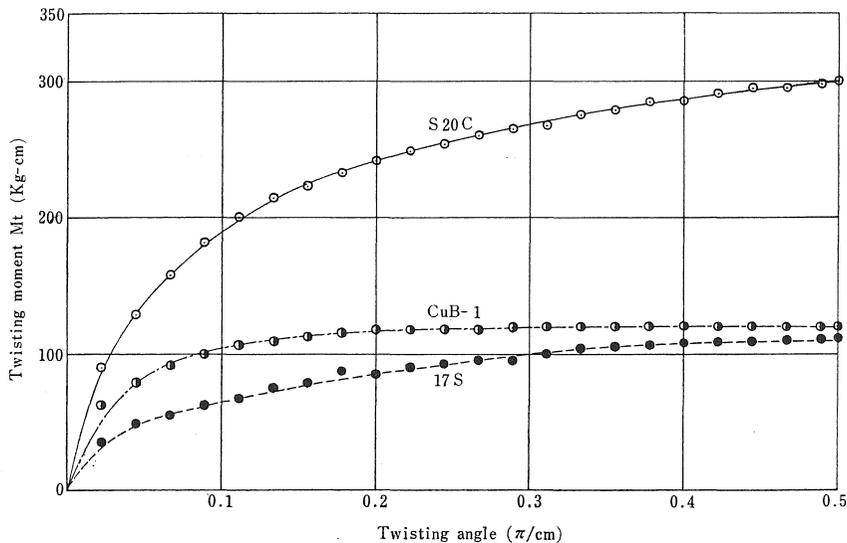


Fig. 3 (a). Twisting moment-Twisting angle Diagram.

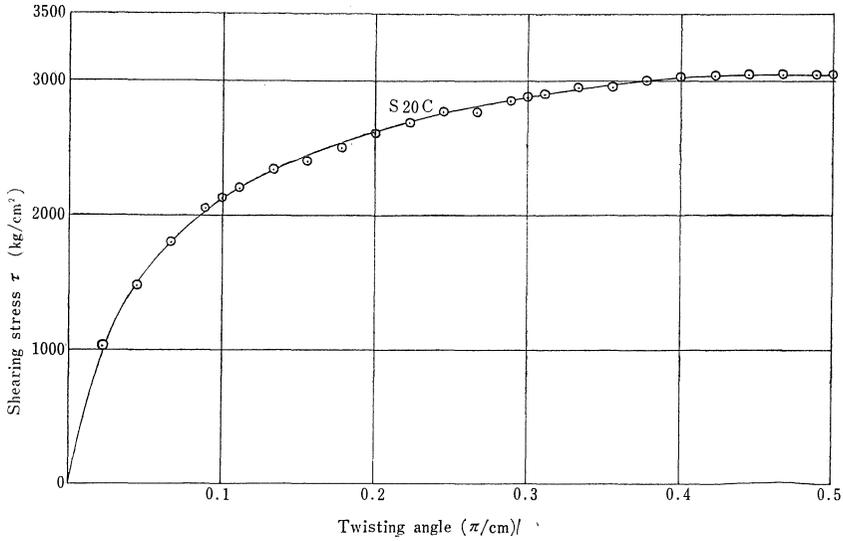


Fig. 3 (b). Shearing stress-Twisting angle Diagram.

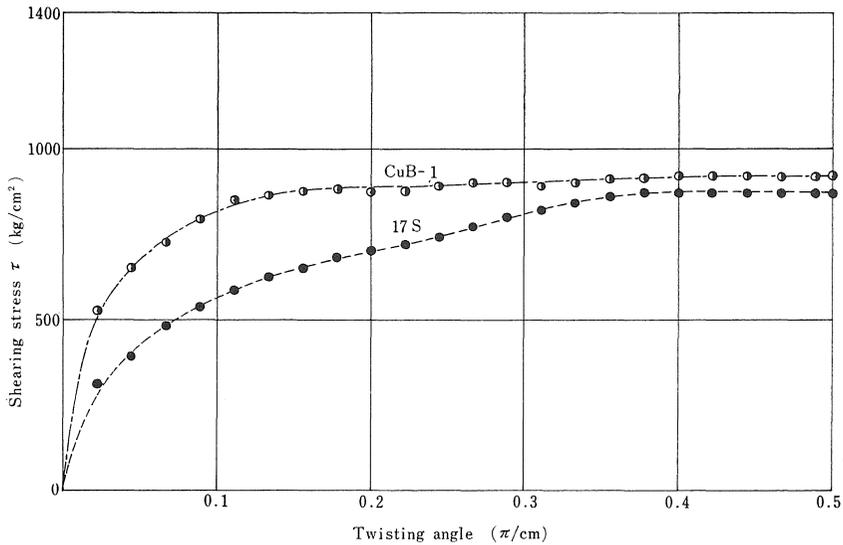


Fig. 3 (c). Shearing stress-Twisting angle Diagram.

3-1. 弾性余効における表面内部応力の変化

種々の振り変形を施し、この振りモーメントを除去した後の試験片表面の縦軸方向および接線方向の微視的表面内部応力の時間の経過につれて変化する状況を測定した結果は各材料ごとにまとめて図示すると Fig. 5 (a), (b), (c) である。

この測定結果から 0.2% C 炭素鋼においては大きな振り変形を施したもののほど速かに安定な状態に達しており、振り変形によって生じた表面内部応力も時間の経過とともに回復しすべての振り角において48時間程度で完了している。また高力アルミニウム合金に関しても同様

な結果が示され、48時間で完了し、表面内部応力の低い安定な状態に達している。ここで0.2% C 炭素鋼と高力アルミニウム合金は縦軸方向における表面内部応力を測定した。さらに接線方向において測定した電気銅についても同様な結果が得られ、やはり48時間程度で回復し、安定な状態に達している。しかし試験片の接線方向に照射したX線の幅が0.5mmと広いために厳密に接線方向の表面内部応力を測定しているかどうかは疑問であり、さらにもっと細いX線照射による測定で明らかにすることができると思われる。

X線による試験片の縦軸方向および接線方向における

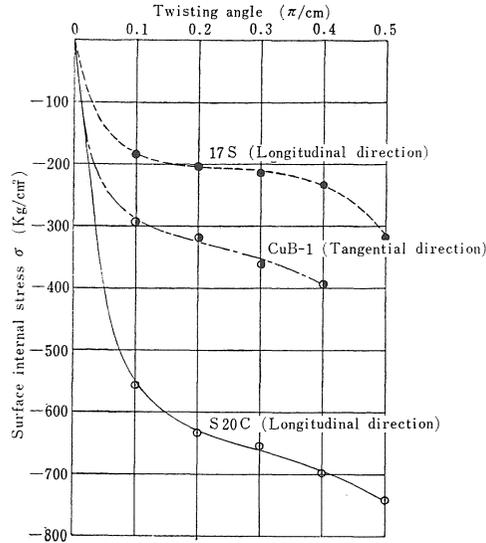


Fig. 4. The relation between surface internal stress and twisting angle.

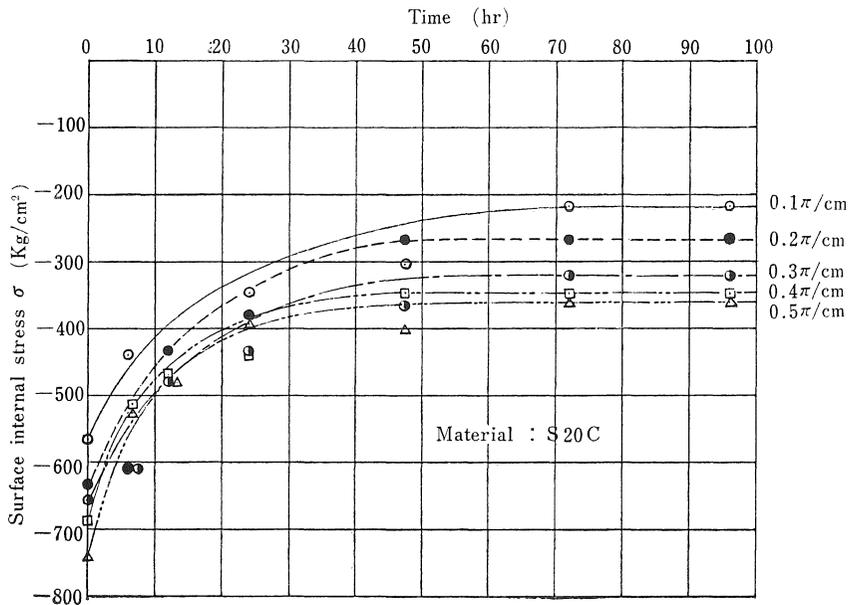


Fig. 5 (a). Change of surface internal stress depend on the passage of time in various twisting deformation.

微視的な表面内部応力測定から、振り変形において荷重除去後には試験片表面に圧縮内部応力が存在することが判明した。

このことは振り荷重負荷の時には滑りにより試験片は伸び、引張り応力が存在する。そして除荷するとともにどろうとする圧縮応力が存在すると説明することができる。

以上の結果から変形を受けた材料は48時間程度で安定な状態に達している。それゆえに48時間以後に加熱処理を加えて、金属の機械的挙動を調べたり、他の実験を進めていくべきである。

3-2. 表面内部応力の加熱による変化

振り変形を受けて除荷後、常温において表面内部応力

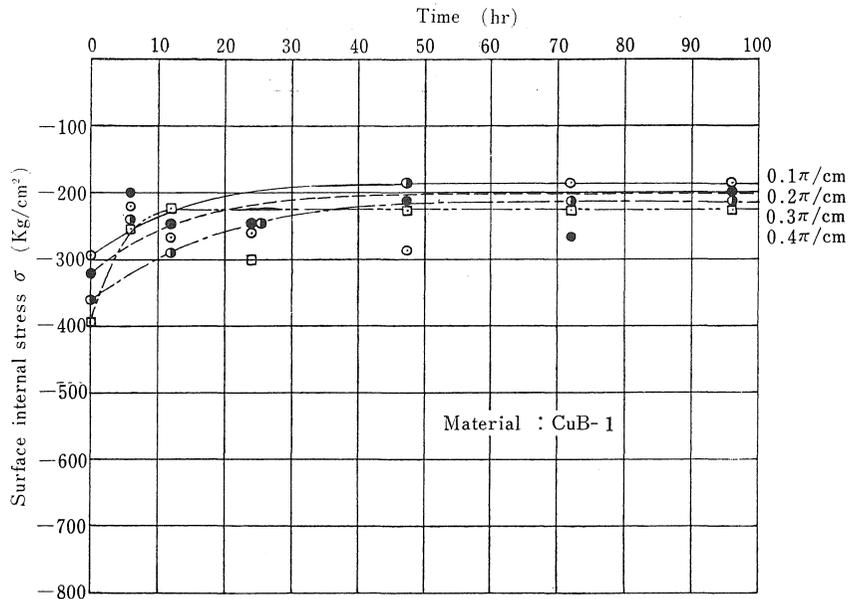


Fig. 5 (b). Change of surface internal stress depend on the passage of time in various twisting deformation.

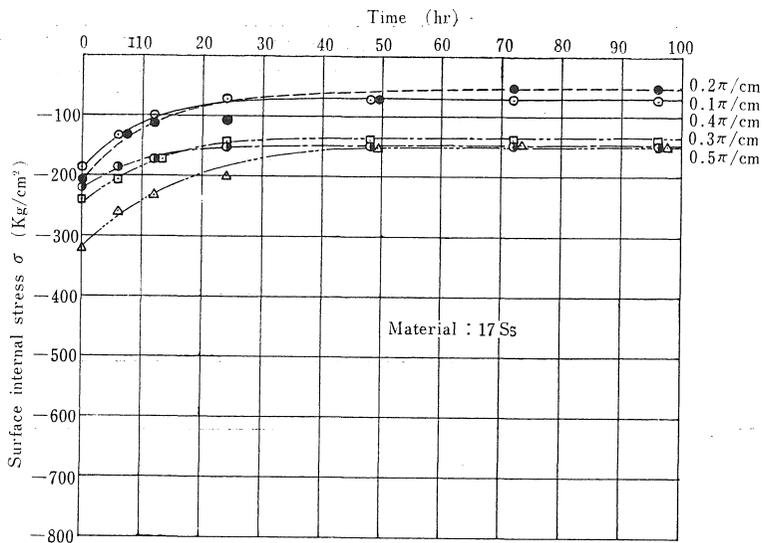


Fig. 5 (c). Change of surface internal stress depend on the passage of time in various twisting deformation.

が安定な状態に達したものの高真空焼鈍による表面内部応力の除去状況を試験片の縦軸方向と接線方向について測定した結果を図示すると Fig. 6 (a), (b), (c), (d), (e) である。

この測定結果によると縦軸方向に関して測定した 0.2% C 炭素鋼は焼鈍温度 300° までは加熱によって生じる内部応力が重畳されて表面内部応力は増加しているが、 300° C から 450° C のすなわち 0.2% C 炭素鋼の再結晶温度範

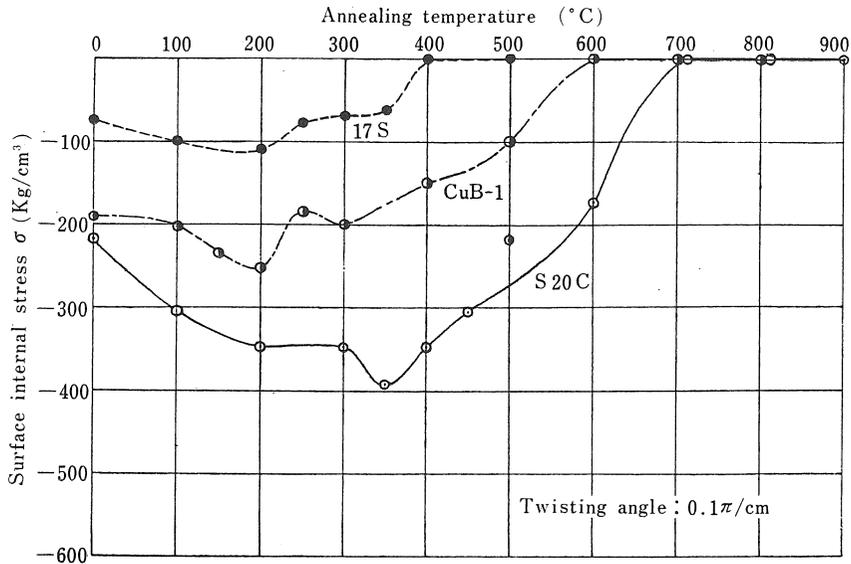


Fig. 6 (a) Change of surface internal stress depend on the high vacuum annealing in a 0.2% carbon steel or a high tensile aluminum alloy (17S) and an electrolytic copper (CuB-1).

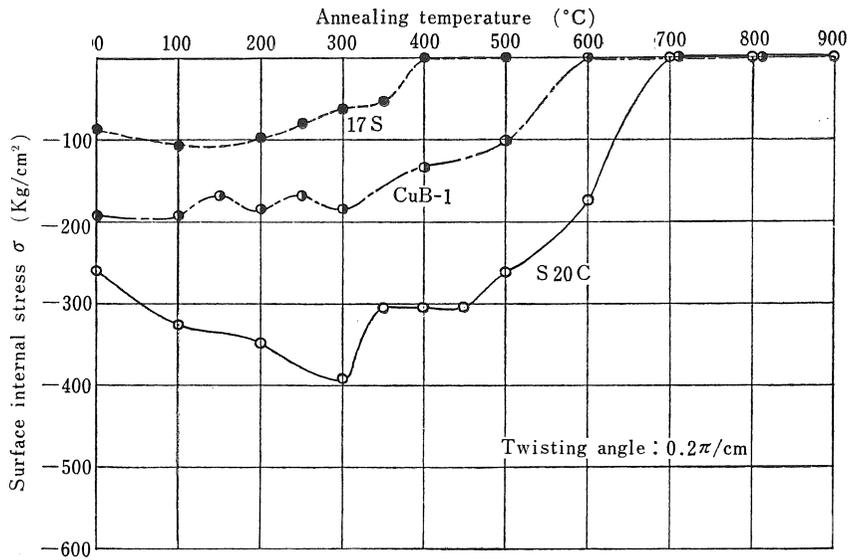


Fig. 6 (b). Change of surface internal stress depend on the high vacuum annealing in a 0.2% carbon steel or a high tensile aluminum alloy (17S) and an electrolytic copper (CuB-1).

屈と思われる所で、すべての振り角において表面内部応力は急激に減少している。また高力アルミニウム合金に対しても同様な結果が得られた。すなわち再結晶温度と思われる250°C近傍において振り変形角が大になるに

たがって表面内部応力は急激に減少しており、この温度範囲において再結晶が起っていると考えられる。さらに接線方向に関して測定した電気銅に対しても、再結晶温度範囲において振り変形角が大になるにつれて表面内部

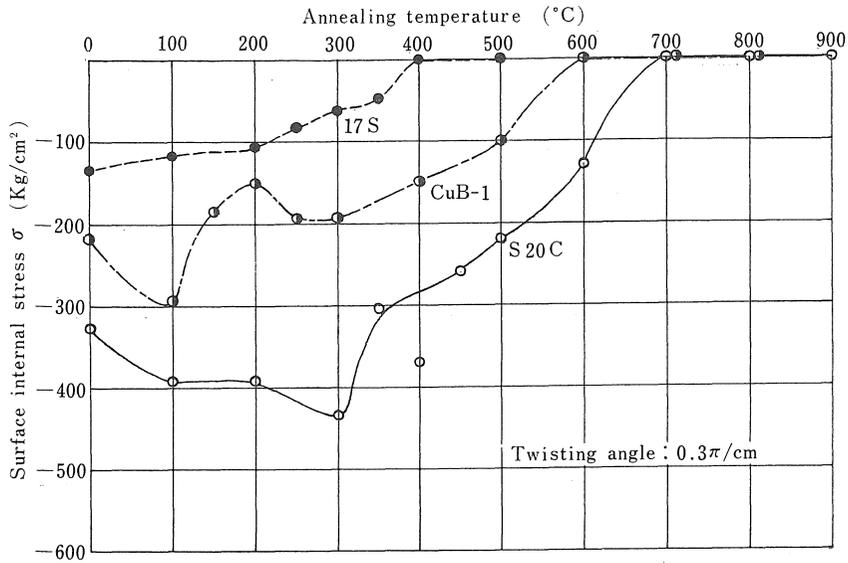


Fig. 6 (c) Change of surface internal stress depend on the high vacuum annealing in a 0.2% carbon steel or a high tensile aluminum alloy (17S) and an electrolytic copper (CuB-1).

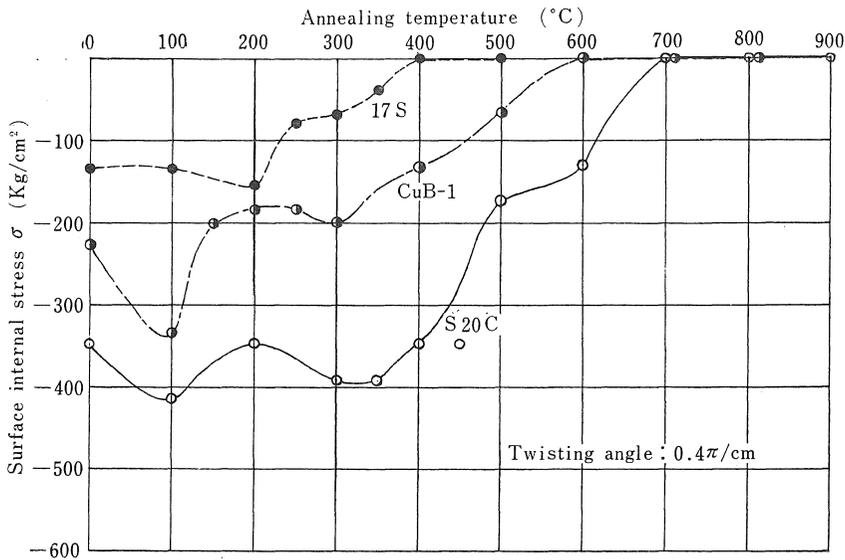


Fig. 6 (d). Change of surface internal stress depend on the high vacuum annealing in a 0.2% carbon steel or a high tensile aluminum alloy (17S) and an electrolytic copper (CuB-1).

応力は急激に減少するという類似した結果が得られた。

再結晶温度以上の温度においては、表面内部応力は0.2% C炭素鋼、高力アルミニウム合金、電気銅ともに徐々に減少し零に至っており、組織変化および結晶粒粗

大化、その他さらに複雑な状態変化等を起こしているのではないかと考えられる。ゆえに0.2% C炭素鋼においては700°C、高力アルミニウム合金では400°C、電気銅においては600°Cで表面内部応力は零になり、振り変形

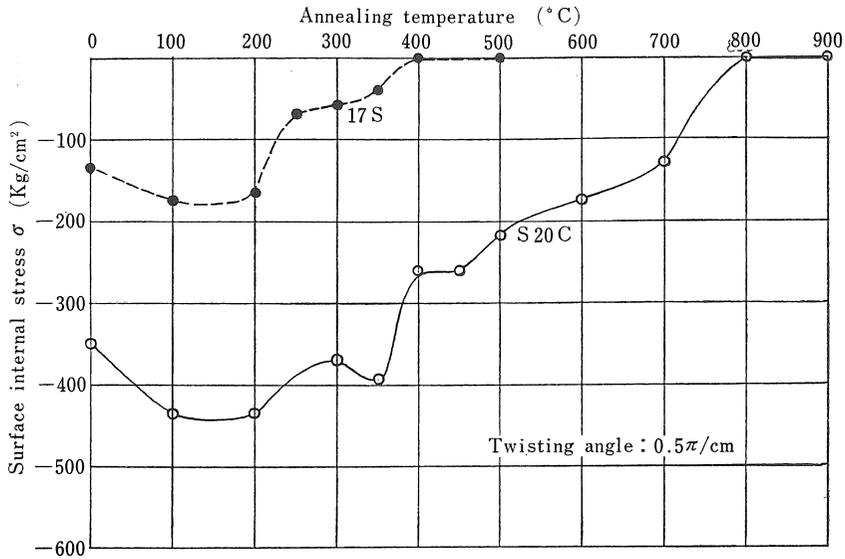


Fig. 6 (e). Change of surface internal stress depend on the high vacuum annealing in a 0.2% carbon steel or a high tensile aluminum alloy (17S) and an electrolytic copper CuB-1.

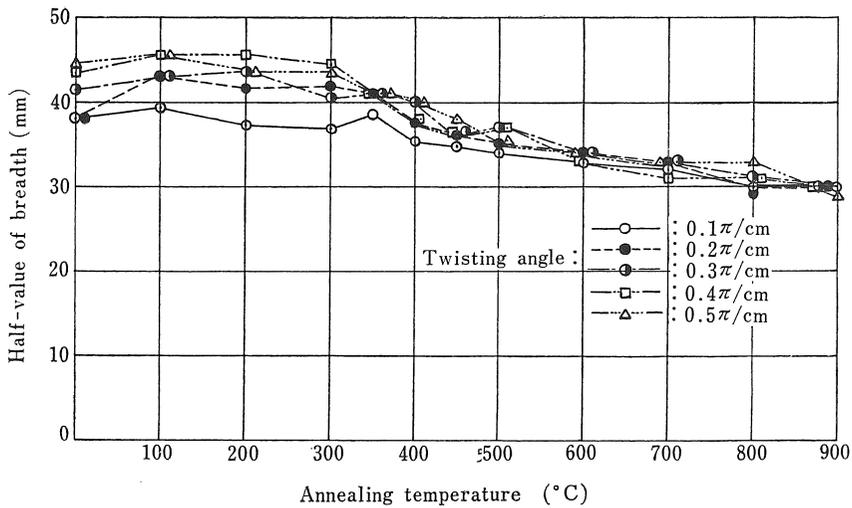


Fig. 7. The relation between half-value breadth and annealing temperature in a 0.2% carbon steel.

によって生じた内部応力は除去されたと考えられる。したがってこの事柄から機械加工などから受ける程度のひずみは、0.2%炭素鋼であれば700°Cで30分、高力アルミニウム合金なら500°Cで30分、電気銅なら600°Cで30分の焼鈍で十分に除去することができる。また種々の

振り変形を施した0.2%炭素鋼試験片の焼鈍温度上昇につれる半価幅の変化を測定して見ると Fig. 7のごとくなる。

半価幅の減少する割合はいずれの振り変形角の場合もわずかではあるが、やはり300°Cから450°Cの再結晶温

Twisting angle : $\Theta=0.4\pi/\text{cm}$
 Annealing temperature : 450°C
 Material : S 20C
 Diffraction plane : (211)
 Tube Voltage : 25KV
 Tube Current : 5mA
 Characteristic X-ray : Cr-K α

Twisting angle : $\Theta=0.4\pi/\text{cm}$
 Annealing temperature : 300°C
 Material : S 20C
 Diffraction plane : (211)
 Tube Voltage : 25KV
 Tube Current : 5mA
 Characteristic X-ray : Cr-K α

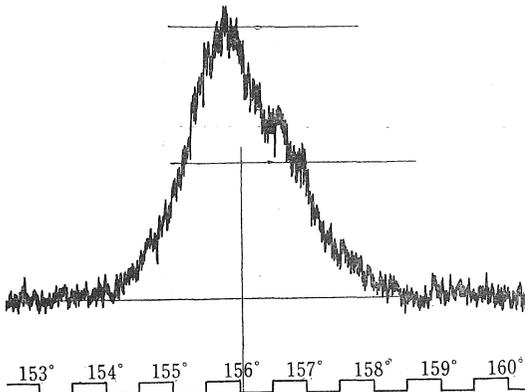


Fig. 8 (a). Diffraction Line Profile

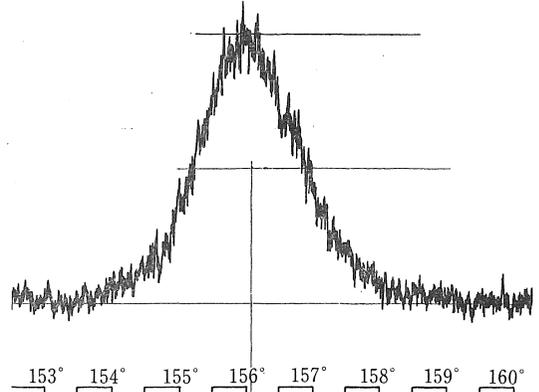


Fig. 8 (b). Diffraction Line Profile

Twisting angle : $\Theta=0.4\pi/\text{cm}$
 Annealing temperature : 200°C
 Material : 17 S
 Diffraction plane : (333)
 Tube Voltage : 30KV
 Tube Current : 20mA
 Characteristic X-ray : Cu-K α

Twisting angle : $\Theta=0.4\pi/\text{cm}$
 Annealing temperature : 250°C
 Material : 17 S
 Diffraction plane : (333)
 Tube Voltage : 30KV
 Tube Current : 20mA
 Characteristic X-ray : Cu-K α

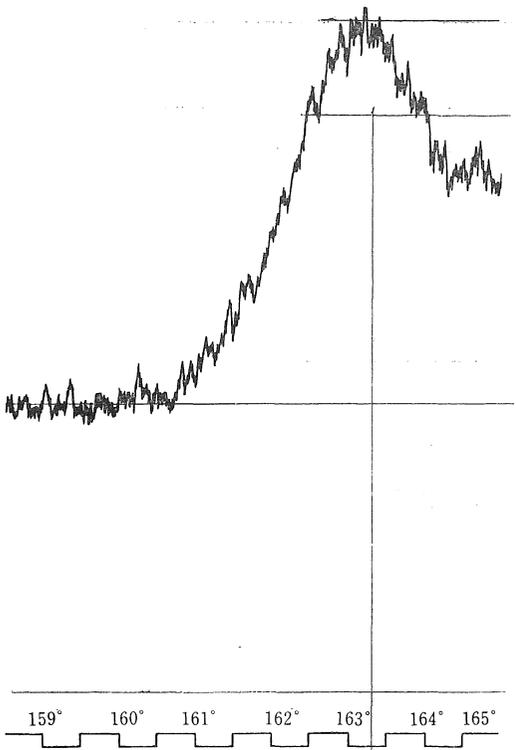


Fig. 9 (a). Diffraction Line Profile

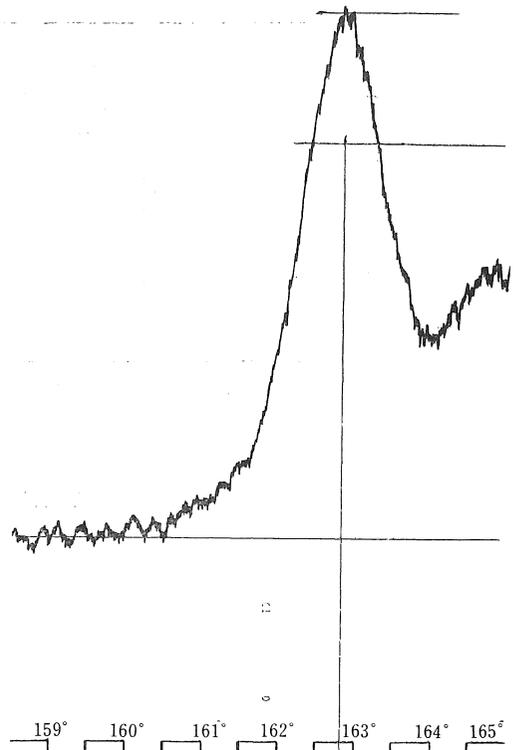


Fig. 9 (b). Diffraction Line Profile

度範囲において減少する割合は大である。

さらにゴニオメーターによる回折線連続走査で Fig. 8 (a), (b) に示すように0.2% C炭素鋼 (211) 面の回折線は300°Cから450°Cの再結晶温度範囲で $K\alpha$ 線が $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ に明瞭ではないが分離してくる傾向を示している。特に高力アルミニウム合金(333) 面の回折線に関しては Fig. 9 (a), (b) に示すように再結晶温度と思われる250°Cにおいて $K\alpha$ 線は明瞭に $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ とに分離してくる。

この事柄はX線回折要論⁽⁴⁾において、カリチーは再結晶が原因していると論じている。

このことを参考にして、以上の結果をまとめて、0.2% C炭素鋼の300°Cから450°C、高力アルミニウム合金の250°C近傍、電気銅の200°C近傍の再結晶温度において、表面内部応力は急激に減少し、回折線が鋭くなり、分離してくることから、この温度範囲において再結晶が起っていると考えられる。

4. 総 括

この研究は振り加工材における微視的な表面内部応力の振りモーメント除去後の時間経過による変化、弾性余効が消失して変形が安定な状態に達した後の高真空焼鈍による表面内部応力の変化をX線により測定し、考察したものである。

実験に供した材料は0.2% C炭素鋼、高力アルミニウム合金および電気銅の3種類を使用した。試験片に機械加工した後、前処理として0.2% C炭素鋼は770°Cで30分、高力アルミニウム合金と電気銅は500°Cで30分のひずみ除去を施した。その後アムスラー式振り試験機により0.1 π /cm, 0.2 π /cm, 0.4 π /cm, 0.5 π /cmの振り変形を与えて測定した。

この測定結果をまとめると次の通りである。

1. 振り変形を受けた丸棒試験片の除荷直後には試験片の縦軸方向および接線方向ともに表面には圧縮内部応力が存在する。
2. 0.2% C炭素鋼の縦軸方向における表面内部応力の時間経過による変化の測定結果から表面内部応力は振り変形角が大なるほど速かに安定な状態に達している。
3. 縦軸方向における0.2% C炭素鋼、高力アルミニウム合金の表面内部応力の変化はともに48時間程度で終了している。また接線方向についても電気銅は48時間程度で終了し安定な状態に達する。
4. 0.2% C炭素鋼の再結晶温度と思われる350°Cから450°Cの範囲において縦軸方向の表面内部応力は急激に減少する。また半価幅の変化も同様である。高力アルミニウム合金では振り変形角が大きくなるほ

ど250°Cにおいて表面内部応力は著しく減少する。また接線方向の表面内部応力は電気銅においても再結晶温度範囲で同じ結果が得られた。

5. 0.2% C炭素鋼では350°Cの範囲において、(211)面の回折線は明瞭ではないが $K\alpha$ 線が $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ とに分離する傾向をもっている。また高力アルミニウム合金は250°Cにおいて、(333)面の回折線は $K\alpha$ 線が $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ とに明瞭に分離してくる。したがって、これらの温度範囲において再結晶が起っていると考えられる。

この研究は振り変形試片の加熱による再結晶の方位に関しての研究の一連として行ったもので、今後、再結晶の方位について確かな結論を出すためX線により測定していくつもりである。終りに臨み本研究を行うにあたり御懇篤な御指導を賜った上田太郎教授に厚く感謝の意を表する。

5. 参 考 文 献

- (1): 上田太郎 「諸種の金属の振り加工による剪断内力の分布と焼鈍によるその変化の研究」
(学位論文)
- (2): 関口春次郎著 「金属の塑性加工と変質」 p 193
- (3): 日本材料学会編 「X線応力測定法」 p 179
- (4): カリチー著 「X線回折要論」 p 260~p 296