X線による残留応力分布測定法について*

平 修 二** 吉 岡 靖 夫***

On the X-Ray Method of Measurement of Residual Stress Distribution

by

Shuji TAIRA

and

Yasuo YOSHIOKA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto) (Musashi Institute of Technology, Tokyo)

Stress measurement by X-ray diffraction has certainly definite advantages. It is the only non-destructive method of determining the residual stress in metallic materials. Another feature is the fact that the localized stress can be measured by this method.

In the field of mechanical and structure engineering, it is said that residual stress in products is the problem of importance in the process of production and also in performance. The distribution of residual stress in these materials is in many cases determined by employing the destructive method, although this method has a little reliability in view of experimental procedure and has adaptability to very limited sort of materials.

Recently the experimental technique of X-ray stress measurement has been surprisingly improved in our country and the field of its application is very much enlarged.

In this connection, in the present paper, some methods of determination of residual stress by means of X-ray diffraction are demonstrated, by taking examples of specimen in the shape of plate and cylindrical bar. The equations for the calculation of residual stress are as follows:

- (1) plate (the case of symmetrical residual stress distribution)

$$\sigma = \sigma_X - \frac{2}{h-2a} \int_0^a \sigma da$$

where σ : residual stress at a distance a from surface. σ_X : measured residual stress by X-ray at the layer a . h : thickness of plate.

- (2) plate (the case of unsymmetrical residual stress distribution)

$$\sigma = \sigma_X - \frac{2}{h-a} \int_0^a \sigma da - (\sigma_{bs} - \sigma_{ta})$$

where σ : residual stress at a distance a from the top surface.

σ_X : measured residual stress by X-ray method at the layer a .

σ_{bs} : initial residual stress at the bottom surface.

σ_{ta} : residual stress at the bottom surface after removing the depth a .

- (3) cylindrical bar

$$\sigma_z = \sigma_{zX} - \frac{2}{r^2} \int_r^a \sigma_z \cdot r \cdot dr$$

$$\sigma_t = \sigma_{tX} - \frac{1}{r} \int_r^a \sigma_t \cdot dr$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{r} \int_r^a \sigma_t \cdot dr$$

where σ_z , σ_t , σ_r : axial, tangential and radial direction residual stress at the radius r .

σ_{zX} , σ_{tX} : axial and tangential direction residual stress by X-ray method at the radius r after removing from surface a to r .

It has been found from the result of present study that among the past investigations on the measurement of residual stress by means of X-ray are many problems open to questions about interpretation of the obtained results.

(Received Aug. 1, 1962)

1. 緒 言

X線による応力測定は、試料表面の残留応力を非破壊的に測定できる唯一の手段として採用されている方

* 原稿受付 昭和37年8月1日, 当協会第1回X線応力測定シンポジウムにて講演(昭37.7)

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 武蔵工業大学

法である。そうして近時、X線発生装置、マイクロフォトメータ、およびガイガー計数管等の発達によって、従来とかく不信の念を抱かれていた測定値の精度も、著者の一人および有間によりたびたび報告されているように、充分信頼に足る精度を有するようになった。

一方、部材の残留応力の挙動を知る場合、表面の応力のみならず、内部の残留応力分布を知りたい場合が多々ある。残留応力分布測定に関しては、従来より種々の方法がとられているが、その代表的なものとして表面より薄層を除去していき、残留応力解放によるひずみ変化より応力分布を求める除去法がある。しかしながらこの方法は、薄層除去の際のひずみと除去厚さとの間の曲線について、曲線のこう配を図式的に求め、これより残留応力を決定するため、こう配の求め方に対して、測定者の主観がはいり、特に表面近傍の残留応力については、大きな誤差を生ずる可能性が大で、極端な場合には、引張りか圧縮かの判断もつきかねる場合も起こり、得られた測定値の信頼度はきわめて低いものとする。この欠点は、特に応力の変化の激しいものでは致命的である。

更に、円筒の残留応力分布測定に関しては、上述の欠点に加えて、一般に行なわれている Sachs 法では、中心部に穿孔および中ぐりを行ない、その際のひずみ変化より残留応力を求めるために、高硬度の試料では穿孔や中ぐりの加工が不可能であり、また穿孔時の発熱や塑性変形などによる残留応力の変化も考えられ、適用範囲も著しく制約される。

X線応力測定法は、表面残留応力を非破壊的に測定できるという利点より、破壊的測定法である残留応力分布の測定には、あまり使用されていないようであるが、この方法によれば、従来の除去法のように、こう配を図式的に求めるという人為的誤差のはいり因子を含まないので、得られるX線測定値の精度さえよければ簡単な補正をするのみで、残留応力分布が得られ、また、円筒試料でも穿孔を行なわずに、外部より薬品による腐食除去ができるので、高硬度の試料にも適用できるので、この分野にX線法を拡張することはきわめて意義があるものとする。

本報告においては、平板および中実円筒のX線による残留応力分布測定法について述べるとともに、その実験例について報告するものである。

2. X線による残留応力分布測定法の概略

表面よりある深さの層における残留応力を測定するには、X線によって測定できる応力は表面のものであるために、必ず測定せんとする層を露出して測定する必要がある。この測定層露出の方法には、表層を部分的に除去する方法と、全面的に除去する法の二とおりが考えられる。

部分的に除去する方法は、局所的な残留応力分布を求めるに適した方法で、Fig. 1 のように表面から内部にかけて小穴をあけて穴の底の応力を測定する方法である。この方法によれば、除去による応力解放はほとんどなく、得られた測定値がそのままその深さにおける残留応力と考えられ、表面近傍に限ればほとんど非破壊的な方法と考えられる。

一方、全面的に除去する方法は、試料全面より徐々に表層を除去して、新表面の残留応力を測定する方法で、この方法によればX線法によって測定不可能な円筒の半径方向残留応力も、接線方向残留応力を測定することにより求めることが可能である。

しかしながら、表層を除去することにより残留応力の解放が起こるので、測定値に対して補正を行なう必要がある。

本報告では、この全面除去の方法によって残留応力分布を求める方法について述べる。

3. 板材の残留応力分布測定

(I) 残留応力分布が板の中心面に対して対称と考えられる場合

Fig. 2 のように、残留応力が板の中心に対して対称分布をする厚さ h なる板を考える。このような例は、焼入焼もどしによる残留応力や圧延の際に発生する残留応力などがあげられる。

このとき、表面から深さ a の層の残留応力 σ は次のように求める。

板の両側から、各 a なる厚さだけ表層を除去する。除去して現われた面の残留応力をX線によって測定してこれを σ_x とする。

両面より表層を a だけ除去したために、その部分に存在した残留応力が消失する。そうして、この応力が残部に一様に加算される。その応力を Fig. 2 (b) のように σ_a とすると

$$\sigma_a = \frac{2}{h-2a} \int_0^a \sigma da \quad (1)$$

で与えられる。

したがって、 σ_x は除去前の残留応力 σ と加算され

Fig. 1 The X-ray method of residual stress distribution measurement by boring

る応力 σ_a の和と考えられる。

すなわち

$$\sigma_X = \sigma + \sigma_a \quad (2)$$

したがって、

$$\sigma = \sigma_X - \frac{2}{h-2a} \int_0^a \sigma da \quad (3)$$

右辺第二項は次のように求める。除去前の表面の残留応力を σ_s とする。第1回目に除去する層を h に対して充分小さくとれば、新表面に現われる残留応力 σ_x との間に近似的に次の関係が成立する。

$$\int_0^a \sigma da \approx \frac{1}{2} (\sigma_s + \sigma_x) a \quad (4)$$

(3)式によって第1回目の除去により深さ a の部分の応力 σ が求まる。以下順次この方法を繰り返すことにより残留応力分布を求めることが可能である。

(II) 残留応力分布が板の両面で非対称と考えられる場合

このような例は、板の片側に高周波焼入れを施したり、浸炭、各種切削研磨等の加工を与えた場合が考えられる。

この場合には、測定せんとする側より表層を除去する。Fig. 3 に示すように、表面圧縮、内部引張りの残留応力分布を有する板を例にして説明する。

まず Fig. 3 (a) に示すように、表層を a まで除去する。その際の新表面の残留応力を σ_x とする。 a まで除去したために表面から a 部までに存在した残留応力が解放されて、それが残部に加算されて、圧縮側に一様に σ_a だけ増加する (Fig. 3 (b))。同時に除去のために板の曲率に変化して除去して現われる表面の応

力は σ_b だけ圧縮側に増加する (Fig. 3 (c))。

したがって、X線により測定される応力 σ_X は次のようになる。

$$\sigma_X = \sigma + \sigma_a + \sigma_b \quad (1)$$

したがって、

$$\sigma = \sigma_X - \sigma_a - \sigma_b \quad (2)$$

σ_a は 3(1) の場合と同様にして、次のように求める。

$$\sigma_a = \frac{1}{h-a} \int_0^a \sigma da \quad (3)$$

σ_b は次の方法にて求める。測定する面の裏側の面の残留応力を表層除去のたびに測定して、その初期値を σ_{bs} とする。 a だけ表面を除去した際にその残留応力が σ_{ba} になると次式が成立する。

$$\sigma_{ba} = \sigma_{bs} + \sigma_a - \sigma_b \quad (4)$$

(3)(4)式を(2)式へ代入して

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_X - 2\sigma_a + (\sigma_{ba} - \sigma_{bs}) \\ &= \sigma_X - \frac{2}{h-a} \int_0^a \sigma da - (\sigma_{bs} - \sigma_{ba}) \end{aligned} \quad (5)$$

となり、深さ a の部分の残留応力が求められる。

4. 中実円筒の残留応力分布測定

Fig. 4 のように、半径 a の中実円筒の半径 r の層の

Fig. 2 Residual stress distribution of plate

- (a) Initial condition
(b) After removing surface layers

Fig. 3 Residual stress distribution of plate

- (a) Initial condition
(b) (c) After removing surface layer

三軸残留応力を求める。軸方向、接線方向および半径方向の残留応力をそれぞれ σ_z , σ_t および σ_r とする。また、 a から r まで表層を除去した際の新表面の軸方向と接線方向の残留応力をそれぞれ σ_{zX} , σ_{tX} とする。この応力はX線によって測定される。

a から r までの表面層を除去することによって、残留応力の解放が起こり、 r の部分の応力は次のようになる。

$$\begin{aligned}\sigma_z + \sigma_z' &= \sigma_{zX} \\ \sigma_t + \sigma_t' &= \sigma_{tX} \\ \sigma_r + \sigma_r' &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

軸方向残留応力 σ_z に関しては、 a から r までの部分に存在している残留応力が表層除去により、残部に一様に加算されたものとして次式が成立する。

$$\pi r^2 \cdot \sigma_z' = \int_a^r \sigma_{zX} \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (2)$$

ゆえに

$$\sigma_z = \sigma_{zX} - \sigma_z' = \sigma_{zX} - \frac{2}{r^2} \int_a^r \sigma_{zX} \cdot r \cdot dr \quad (3)$$

一方、接線方向残留応力 σ_t および半径方向残留応力 σ_r に関しては、まず半径 r の部分において次の関係が成立する。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad (4)$$

この(4)式を変形すれば次のようになる。

$$d(r \cdot \sigma_r) = \sigma_t \cdot dr \quad (5)$$

(5)式を a から r まで積分して、さらに $r=a$ にて $\sigma_r=0$ なる境界条件を代入すれば次のようになる。

$$-r \cdot \sigma_r = \int_a^r \sigma_t \cdot dr \quad (6)$$

したがって

$$\sigma_r = -\frac{1}{r} \int_a^r \sigma_t \cdot dr \quad (7)$$

Fig. 4 Residual stress distribution of cylindrical bar

また、表層を a から r までに除去した際に、 σ_r と r の間のこう配が変化しないものと仮定すれば、次式が成立する。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{(\sigma_t + \sigma_t')}{r} = 0 \quad (8)$$

したがって(4), (8)両式より次の関係が求められる。

$$\sigma_r = -\sigma_t' \quad (9)$$

よって、 σ_t は次式にて求められる。

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \sigma_{tX} - \sigma_t' \\ &= \sigma_{tX} - \frac{1}{r} \int_r^a \sigma_t \cdot dr\end{aligned}\quad (10)$$

となり、円筒の三軸残留応力が求まる。

5. 実験例

上の測定法による代表的な測定例を次に述べる。

(I) 使用材料

板の場合はS55C材で、対称分布の例では、研削仕上げ後、600°Cより水焼入れしたもの、非対称分布の場合では、870°Cにて真空焼なまししたもの片面にバフ研磨を施したもので、寸法は両者とも5.7×35×80のものを使用した。

中実円筒の場合は、0.2%炭素鋼で直径20、長さ80の丸棒を600°Cより水焼入れをしたものである。

(II) 測定装置

測定に使用したX線装置は、ガイガー計数管を用いた自動記録式平行ビーム型ひずみ測定装置で、クロムの対陰極を用いて、(211)面の残留応力を測定した。

除去厚さの測定はマイクロメータおよび精密てんびんによった。

表層除去は、15%硝酸液を使用して、腐食除去中の温度上昇を防ぐために、液中にパイプにて水を通じ、同時に攪拌を行なった。

(III) 測定結果

Fig. 5 に中実円筒の接線方向および半径方向残留応力分布を、Fig. 6 に軸方向残留応力分布を示す。表層においては σ_t , σ_z ともに圧縮の残留応力が生じ、中心

Fig. 5 Tangential and radial residual stress distribution of the cylindrical bar
(20φ×80, 0.2%C, 600°C W.Q.)

部で引張残留応力となる。この測定に関しては、いずれの場合にでも図式積分を行なう必要があり、また近似計算を行なう必要がある。そこで得られたX線測定値に対して、近似計算を行なったものを第1近似値として、更にこの第1近似値をもとにして、第2近似値を求めるという逐次近似法によって、第3近似値まで求めたものが Table 1 で、 σ_t について求めたものである。これによれば、中心部へ近くなるにつれて、第1近似値と第2近似値の間の差は大きくなるが、第2近似値の間の差はほとんどないようである。

Fig. 6 Axial residual stress distribution of the cylindrical bar
($20\phi \times 80$, $0.2\%C$, $600^\circ C \rightarrow W.Q$)

Table 1 Experimental result of tangential direction residual stress at the cylindrical bar

Radius r	$\sigma_{t,x}$	Tangential direction residual stress σ_t		
		The 1st order approximate value	The 2nd order approximate value	The 3rd order approximate value
10.005	-14.2	-14.2	-14.2	-14.2
9.989	-13.4	-13.4	-13.4	-13.4
9.967	-10.2	-10.1	-10.1	-10.1
9.778	-11.2	-10.7	-10.7	-10.7
9.506	-12.9	-11.8	-11.8	-11.7
9.115	-9.5	-7.9	-7.9	-8.0
8.851	-9.9	-7.8	-7.8	-7.9
8.365	-5.6	-2.5	-2.5	-2.7
8.005	-2.2	+1.0	+1.0	+1.0
7.191	-2.6	+1.2	+0.7	+0.7
6.442	-1.6	+2.2	+1.5	+1.8
5.670	-1.2	+2.7	+2.1	+2.2

Fig. 7 Residual stress distribution of the plate
($5.7 \times 35 \times 80$, S55C, $600^\circ C \rightarrow W.Q$)

Table 2 Experimental result of residual stress measurement of the plate

Depth from surface a	σ_x	$\frac{2}{h-2a} \int_0^a \sigma da$	σ
0	-18.5	—	-18.5
0.030	-21.5	-0.2	-21.3
0.099	-8.2	-0.6	-7.6
0.242	-8.4	-1.1	-7.3
0.381	-9.1	-1.5	-7.6
0.592	-6.4	-2.3	-4.1
0.812	-3.4	-2.8	-0.6
1.054	-3.4	-3.5	+0.1
1.271	-2.4	-4.2	+1.8
1.413	-1.8	-3.4	+1.7
1.752	-0.8	-3.8	+3.0

Fig. 8 Residual stress distribution of the plate (Buff polished)

次に Fig. 7 に対称分布の場合の残留応力分布を示す。円筒の場合と同様に、表面圧縮、中心部引張りの残留応力分布である。X線によって測定された残留応力はいずれも圧縮応力のみであり、Table 2 に示すような補正を行ない残留応力分布が求まる。

更に Fig. 8 に非対称分布をなす場合の測定例を示す。バフ研磨を行なった場合は、表面ごく近傍にのみ圧縮残留応力が生ずるが、直ちに減少していく。

6. 実験結果の考察

中実円筒および対称分布をなす板材では、熱応力による残留応力として、表面圧縮、内部引張りになることは、残留応力発生機構からも明らかであり、測定結果もこれを表わし、残留応力の平衡条件もほぼ満足しているものと考ええる。

また、積分項の計算も第3近似値を求めればば充分と考える。

したがって、X線法によって得られた応力は、著者の一人および有間によって報告されている³⁾、回折面依存性の問題はあるとはいえ、機械的な残留応力に対応するものと考えて無理はないようである。

しかしながら、この種の問題については、従来より多くの研究が発表されているので、これらのうちの代表的なものとの対比を試みる。

Smith と Wood によれば⁵⁾、塑性引張りをした試料の表層から順次、薄層を除去していくとき、常に圧縮残留応力が観察されたということより、次のような解釈を与えている。すなわち、試料内に異なった降伏応力をもつ、A, B 二つの部分があり、A 部は B 部より弱いものとする。外力を加えると A は B より低い応力で降伏して B より弾性ひずみが小さくなる。そこで除荷すれば、B 部は A 部より収縮するために、引張残留応力が生じ、A 部に圧縮残留応力が生じて平衡を保つ。軟鋼を引張って除荷した際に現われる X 線による残留応力は、(211)面や(310)面のものが主で、フェライト相のものを示している。そうしてこれがセメントタイト層の引張残留応力と平衡するために、圧縮残留応力⁶⁾が測定されるとしている。同じような結論は Hauk も出している。

しかし、これらの考察に従えば、X線によって測定される残留応力は、局所的に平衡しているいわゆる微視的残留応力を測定していることになり、一般の巨視的残留応力を測定していることにならない。ゆえに機械的な残留応力の測定は X 線法によっては不可能であるとの結論となる。

しかしながら、Smith らの実験では残留応力の解放の影響を考慮に入れずに、単に薄層を除去して測定した値をもとにした考察であり、本報告のように応力解放の影響を考慮して求めた場合には、機械的応力と対応

するものと考えられるので、上述の考察にははなはだ疑問の点があるものと考ええる。

次に、板材の非対称分布の実験例について、従来の除去法との関連について述べる。Fig. 8 の実験例では表面の応力は約 -35 kg/mm^2 である。そうして第1回目の除去で表面層を 6μ 取っている。従来の除去法により、裏面のひずみを測定するものとして、この X 線測定値より逆算すれば約 -3.6×10^{-6} となる。このひずみは、一般の機械的ひずみ測定法では検知不可能であり、多くの場合、ひずみ変化はないものと考えられる。また、抵抗線ひずみ計によっても、市販のひずみ計の最小目盛が $\pm 5 \times 10^{-6}$ であることを考えれば、精度よく測定することはほとんど不可能であり、除去法の感度および精度は著しく低いことは明らかである。このために Möller と Neerfeld は塑性引張りをした円筒の表面の残留応力を X 線によって測定すれば、ある値が求まるのに対し、Sachs 法により機械的残留応力を求めても応力は存在しないことを述べ、また、Davidenkov と Timofeeva もアルミ板について同種の結果を出して、X 線による残留応力と機械的残留応力は異種のものであると述べているが、このような例では残留応力はごく表層に限られるために、実験例で示したと同様に機械的な測定法では残留応力を検知しえなかったためと考える。

7. 結 論

X 線による板材および中実円筒の残留応力分布の測定法について述べ、数種の例について実験した結果、従来の X 線応力測定に関する研究の考察の一部には、きわめて疑問とせざるをえない点が指摘され、X 線応力値が機械的残留応力に対応することを示した。

また同時に、従来より使用されている除去法について X 線による測定結果より検討した結果、その精度は非常に少ないことが明らかにされた。

なお、X 線による測定値も、回折面依存性があり未解決の点はあるが、機械的測定法の精度の信頼性が小さい現状では、X 線による測定値のほうがよりよい精度を与えるものと考ええる。

付 録 (X 線測定条件)

X 線にて残留応力を測定する際には、測定する材料に適した回折線および測定法を選択することが重要である。本実験においては、あらかじめ同種の材料について予備実験を行なったところ、次の結果を得たのでこれをもとにして測定条件を決定した。

自動記録式では、カウント数と時定数の組合せによって生ずる回折線像に差異が見られる。Fig. 9 は種々の条件で求めた回折線像を示すものであり、この中ではカウント数 200 c/s、時定数 16 秒のものがいちばん測定しやすいものと判定して採用した。なお、時定数

Fig. 9 X-ray diffraction pattern

(S 55 C, 600°C→W.Q., $\psi_0=45^\circ$)

(a)	Count range (c/s) 500,	time const. (sec) 8
(b)	200,	8
(c)	100,	16
(d)	200,	16

Fig. 10 Measurement methods of peak position of X-ray diffraction line

- (a) Tangential method
- (b) Half-value breadth method

Fig. 11 An example of measurement of peak position

(S 55 C, 600°C→W.Q.)

を長くすると、ピーク位置がずれて、格子面間隔の絶対値測定は不適当であるが、応力測定の場合はピーク位置の差を問題とするので、本実験では時定数を長くとり、きれいな回折線をとるようにした。

ピーク位置の測定法には Fig. 10 (a), (b) に示すような切線法と半価幅法とが一般に用いられている。しかし、切線法では線の引き方によって、ピーク位置が著しくずれる場合がある。これに対して半価幅法ではピーク高さの半分、すなわち半価幅の位置の多少の上下によっては、ピーク位置にほとんど影響が今回の実験例では見られないので、この方法を採用した。

測定例の一つを Fig. 11 に示す。

なお、厳密にいうと、 $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線を分離して

ピーク位置を求める必要があるが、クロムの $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線は距離が近く、分離を行なうことが困難で実用的ではないので、本例ではすべて $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ 両回折線の混合したものについてピーク位置を求めた。

参 考 文 献

- 1) 平, 有間, 機械学会第 39 期講演会前刷集 (1962-4)
- 2) 平, 有間, 材料試験協会第 11 期講演会前刷集 (1962-5)
- 3) 平, 有間, X線応力測定シンポジウム前刷集 (1962-7)
- 4) 応力測定法 (1955) 朝倉書店
- 5) S.L. Smith and W.A. Wood, Proc. Roy. Soc., A, 132, 404 (1944)
- 6) V. Hauk, Z. Metallkunde, Bd. 46, Heft. 1, 33 (1955)
- 7) Progress in Metal Physics, 3, (1952)
- 8) N.N. Davidenkov and M.N. Timofeeva, J. Tech. Phys., USSR, 16, 283 (1946)

(650 頁より)

多結晶ニッケルの表面層のすべり応力と変形した材料の残留応力に対するその影響 (The Flow Stress of Surface Layers of Polycrystalline Nickel and its Influence on the Residual Stresses in Deformed Specimens) K. Kolb and E. Macherauch, Phil. Mag., vol. 7, p. 415/426 (1962)

1949 年に Greenough は、X線を用いて材料に塑性変形を与えた後の微小残留ひずみ(第 2 種格子ひずみ)の大きさが結晶粒の方向により異なることを確かめ、これを多結晶の結晶粒による降伏点の相違によって説明し、定量的にも一致する結果を得た。しかし、その後、Macherauch らによる研究では、アルミニウムや銅などの f.c.c. に対してはこの Greenough の理論があてはまらないことが結論された。そこでこの論文では、ニッケルについてこれらを調べている。

引張試験の材料は純ニッケルで、電解研磨の後、焼なましする。断面の大きさは $2 \times 3 \text{ mm}$ 、結晶粒の径は約 30μ である。X線は $\text{CoK}\alpha$ 線、標準物質としてはゲルマニウム粉を用い、背面反射法で $\{420\}$ と $\{313\}$ 面を調べた。多くの結晶から反射を得るために、二つの方法を試みた。すなわち一つは試験片を $\pm 2^\circ$ 振動させるもので、もう一つは X線管を試験片に平行に移動させる方法である。

荷重をかけた状態と除荷後に、それぞれ $\sin^2\psi$ に対する格子ひずみの大きさを測定したが、これらはいず

れも Greenough の理論から期待されるような曲線上にはおらず、むしろ少しばらついてはいるが、ある傾きの直線上にある。つまり巨視的な応力の存在を示している。そこでこれから応力を求めると、負荷状態では表面の応力は試験片全体の平均応力より小さい。降伏点を過ぎると変形とともにこの差が大きくなる。除荷後は反対方向すなわち圧縮の残留応力を生じ、これは変形とともに増大する。

以上の結果から、まず $\sin^2\psi$ に対してひずみをプロットすると直線からずれることがあるが、これは全く統計的なもので、結晶粒相互の干渉による局部的応力によると考える。また、Greenough の言うように、残留応力の発生が表面と内部の結晶との降伏応力の差によるのならば、応力は降伏点を越すと直ちに現われ、その後一定に保たれるはずである。ところが実験結果は残留応力がひずみとともに増大しているので、著者らは、これを表面と内部の結晶粒との加工硬化の過程に巨視的な不均一があることによると説明している。

$\{420\}$ 面と $\{313\}$ 面の表面残留応力は同じ傾向を示し、ひずみとともに増大するが、定量的には $\{313\}$ のほうが圧縮応力が大きく出る。

結局、著者らは Greenough の理論はニッケルについても一般的にはあてはまらないことを結論している。

(本田和男)

(692 頁へ)