X線による応力測定法に関する研究*

(測定値の回折面依存性について)

平 修 二** 有 間 淳 一**

X-Ray Investigation of Stress Measurement

(On Diffraction Plane Dependence)

by

Shuji TAIRA and Jun'ichi ARIMA
(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

Recently, the experimental procedure of X-ray stress measurement has been notably improved because of improvement of the equipment for use as well as of revision of theoretical background. However, there are a few problems that want further investigations. One of them is the question whether the stress values obtained from the measurement of a state of stress by using different lattice plane coincide or not. This problem of diffraction plane dependence has been discussed to some extent up to date, but its real feature is still in the vague. Consequently, considering from the stand point of engineering application, it is important to determine the most favourable diffraction plane for the measurement of stress through the use of characteristic X-ray. In order to clear up the problem, the author performed the following experiments.

Two sorts of materials were used in this experiment, one being annealed specimens of 0.07% carbon steel and the other a plastically extended specimens of 0.13% carbon steel plate. All specimens were etched before subjecting to X-ray photography. The characteristic X-ray of $\text{CoK}\alpha_1$, $\text{CrK}\alpha_1$ and $\text{FeK}\alpha_1$ were radiated to the specimen surface through double pin hole of 1 mm in dia. and stresses were measured by adopting the diffractions from (310), (211) and (220) atomic planes. Since it is important in stress measurement to have an accurate measure of the distance between film and specimen surface for each exposure of film, the standard substance was used and both diffraction lines of standard substance and objective materials were taken on the same film.

Intensity distribution curve was taken from each pattern by using an automatic recording type microphotometer. The distance between peak position of intensity of diffraction from standard material and specimen was measured from these curves. This process led us to very easy detection of the peak of X-ray diffraction and also to exact measurement of length on the film. Stress determination was practiced by employing so-called $\sin^2 \psi$ method.

Two series of experiments were carried out as follows;

(A) A special miniature bending testing machine was used and surface stress on specimens of annealed 0.07% carbon steel was measured by X-ray at several stages of bending within elastic range. The mechanical stress and the value of X-ray stress which was obtained from each lattice planes were compared.

(B) Experiments were made concerning the diffraction plane dependence in the measurement of residual stress that was produced by plastic deformation. Annealed 0.13% carbon steel specimens were stretched beyond yield point. At several stages of loading the load was removed and the surface residual stresses were measured using (310), (211) and (220) atomic planes obtained by $\text{CoK}\alpha_1$, $\text{CrK}\alpha_1$ and $\text{FeK}\alpha_1$ radiation, respectively. On the other hand, well known corrosion method for measurement of residual stress was adopted, in order to correlate the results with the residual

* 原稿受付 昭和37年8月8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

stress determined by X-ray method.

The conclusion of the present study is as follows ;

(1) As far as mechanically applied stress is concerned, the stress value determined by means of X-ray agrees very well with the mechanical stress. This coincidence gives us a proof of high accuracy of the X-ray stress measurement.

(2) Concerned with the determination of residual stress produced by plastic deformation by means of X-ray, it was confirmed that the values of residual stress obtained from measurement on the diffraction lines of (310) atomic plane by $\text{CoK}\alpha_1$ and (211) atomic plane by $\text{CrK}\alpha_1$ radiation were close to each other, but the values due to (220) plane by $\text{FeK}\alpha_1$ radiation is likely to disagree from these measurements. Comparison of residual stress distribution determined by X-ray method and that due to corrosion method showed the same trend as above, that is, the distributions of residual stress obtained from the measurement on diffraction lines of the upper two atomic planes were close to the distribution determined by corrosion method as compared with that due to (220) atomic plane. The reason of this trend would exist in the isotropy of plastic deformation in the material.

(Received Aug. 8, 1962)

1. 結 言

筆者らは前報¹⁾において、X線による応力測定法に関する基礎的な問題として、測定値に及ぼすX線の照射面積の影響、および $\sin^2\psi$ 法の実用上の意義について実験的研究を行ない、実際測定に関し適当な条件を選べば、非常に精度の高い応力値を求めうることを提唱した。しかしながら、X線を用いて応力を測定する場合は、金属結晶の微視的構造変化を測定して応力値を求めるために、測定に関して諸種の条件の影響を伴う。すなわち、炭素鋼の焼なまし材、軽度の加工材のように結晶の内部ひずみが小さい材料に対しては、 $\text{CoK}\alpha_1$ 線による (310) 面回折線を測定X線に選んで、応力値を求める。しかしながら、強加工あるいは焼入れなどを施した、いわゆる内部ひずみの大きな材料に関しては、 $\text{CoK}\alpha_1$ 線を用いるときは、大きな内部ひずみのために極端に回折線が broadening を起こし、測定可能な回折線が得られないために、 $\text{CrK}\alpha_1$ 線による (211) 面回折線を測定X線に選んで応力値を求める。このような場合、金属結晶が完全に等方体であるならば、測定する試料の回折面が異なっても、求める応力値に差異を生ずることはないものと考えられる。

しかしながら、結晶は弾性的に異方性であり、また塑性変形に関しても結晶学的に異方性を示すことが報告されている。したがって、塑性変形を受けた金属結晶には、微視的な残留格子ひずみにも異方性が存在することが考えられる。これらの点を考慮すれば、異なった格子面から得られた残留応力値にも差異を生ずることが考えられる。したがって、X線を用いて残留応力を測定する場合には、上記測定値に及ぼす回折面の依存性の問題はきわめて重要な因子と考えられる。

本報告においては、同一試料に対して、 $\text{CoK}\alpha_1$ 線、 $\text{CrK}\alpha_1$ 線、および $\text{FeK}\alpha_1$ 線の各特性X線により異なった格子面からの回折線を用いて応力測定を行なえば、求める応力値にいかなる影響を与えるか、またその場

合求める応力値に回折面による依存性が存在すれば、実際腐食法などの他の残留応力の測定法により求めた値と、いかなる対応を示すかを詳細に検討するために、X線による応力測定法との対応において、腐食による残留応力の測定法を用いて残留応力を測定した結果について述べる。

2. 実験方法

上述のように、本研究は回折面の異なる3種類の特性X線により求めた応力値が機械的表面応力、および腐食法による残留応力測定値と比較して、いかなる差異を生じているかについて実験的研究を行なったものであり、以下これらの実験を各々実験[A]および実験[B]として述べる。

(I) 実験 [A]

(i) 試験片 実験[A]において用いた試験片は、0.07%炭素鋼の焼なまし材および研摩材であって、所定の形状および寸法に仕上げ加工を施したのち、960°Cより水焼入れを行ない、引き続き650°Cで2時間、真空中でひずみ取り焼なましを行なったものを焼なまし材、これにエメリー紙およびバフで両面研摩を施したものを研摩材として採用した。試験片の形状および寸法は Fig. 1 (a) に示す。

(ii) 応力の負荷方法 実験[A]に用いた応力負荷装置は、Fig. 2 に示すものであって、試験片両端部をボルトで締めつけることによって、順次試験片に均一

(a) for bending test

Fig. 1 Specimen

な曲げ応力を加え、生ずる最大たわみ量を直接ダイヤルゲージ (1/1 000 mm) で読み取り、試験片に負荷された応力値を計算によって求めるとともに、上述の負荷応力値の任意の段階において、(iii) において述べる方法を用いてX線により応力を測定し、計算により求めた応力値とX線により求めた応力値の両者を比較検討した。なおこの場合、試験片中央両面に貼布したストレインゲージ (K-22 共和無線) によりひずみ量を測定し、試験片に負荷される応力をできうるかぎり正確に求めることを試みた。

(iii) X線による応力測定方法 実験[A]においては各応力段階で、CoK α_1 線、CrK α_1 線、およびFeK α_1 線を順次使用し、それぞれの回折格子面より得られる回折線の peak 位置より cosec θ_ϕ を求めた。すなわち、用いたX線装置は可変対陰極型X線管であり、CoK α_1

Fig. 2 Bending apparatus

線、CrK α_1 線、およびFeK α_1 線を照射して得られる(310), (211), および(220)面回折線を背面反射法によりフィルム上に求め、次式により応力値を求めた。X線使用条件を一括して Table 1 に示す。

$$\sigma_x = K(\text{cosec } \theta_\phi - \text{cosec } \theta_\perp) \quad (1)$$

$$K = \sin \theta_0 \left[\frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{\sin^2 \phi} \right]$$

θ_0 : 無応力状態の結晶に対するX線の回折角

$\theta_\perp$: 試料法線方向より入射したX線の回折角

θ_ϕ : 試料法線方向より ϕ_0° 傾けて入射したX線の回折角

K: X線の入射角 ϕ によって定まる定数

(cosec θ_0 , $\theta_\perp$, θ_ϕ は格子面間隔 d に相当する)

なお応力測定法としては、筆者らが前報にくわしく報告した結果に基づき、 $\sin^2 \psi$ 法を採用した。すなわち試験片表面中央部に上記各種のX線 (CoK α_1 , CrK α_1 および FeK α_1) を直径 1 mm の線源にして、垂直および測定方向を含む平面内において、 0° , 15° , 30° , 45° 方向より入射して得られる (310), (211) および (220) 面回折線の半径より cosec θ_ϕ (格子面間隔 d) を測定した。これより cosec $\theta_\phi - \sin^2 \psi$ の直線関係を求め、(1) 式を用いて応力値を算出するのであるが、実際応力測定に関し、外応力に基づく格子面間隔の変化をX線の入射角 ϕ を二、三変化させて、各々に対応する cosec $\theta_\phi (d\phi)$ の直線性より求めるために、この cosec $\theta_\phi - \sin^2 \psi$ の直線関係を吟味することにより、信頼度の高い結果が得られるものと考えた。

なお上の場合 cosec θ_ϕ (格子面間隔 d) を精密に測定するため、標準物質として Ag 粉末 (CoK α_1 , FeK α_1 の

Table 1 Employment condition of X-ray

	Used materials	Used X-ray	Filter and standard	Slit and rad. area	X-ray condition	Used film	Method of stress measurement
Experiment A	0.07 % carbon steel Annealed and polished	CoK α_1 (310)	$\frac{\text{Fe}}{\text{Ag}}$	1 mm ϕ 0.78 mm ²	35 kV 15 mA 20 min exp.	Industrial 200 type	$\sin^2 \psi$ method
		CrK α_1 (211)	$\frac{\text{V}}{\text{Cr}}$	"	35 kV 15 mA 18 min exp.	"	"
		FeK α_1 (220)	$\frac{\text{Mn}}{\text{Ag}}$	"	30 kV 10 mA 30 min exp.	"	"
Experiment B	0.13 % carbon steel Worked	CoK α_1 (310)	$\frac{\text{Fe}}{\text{Ag}}$	"	35 kV 15 mA 20 min exp.	"	"
		CrK α_1 (211)	$\frac{\text{V}}{\text{Cr}}$	"	35 kV 15 mA 18 min exp.	"	"
		FeK α_1 (220)	$\frac{\text{Mn}}{\text{Ag}}$	"	30 kV 10 mA 30 min exp.	"	"

場合)およびCr粉末($\text{CrK}\alpha_1$ の場合)を用いて, 同一フィルム上に, 被測定物の回折線と上記標準物質の回折線を同時に求め, フィルム-試料間の距離および回折線の半径を正確に求めよう留意した。またこの場合の回折線半径の測定には, 従来用いられてきた方法(スケール, コンパレーター, または低倍率望遠鏡を使用)と異なり, 筆者らは自動記録式マイクロフォ-

トメーターを採用し, 標準物質および被測定物の回折線 peak 位置を正確に求めることを試みた。

測定結果の一例を Fig. 3 (a) および Table 2 に示す。すなわち, Fig. 3 (a) は 0.07% 炭素鋼について, $\text{CoK}\alpha_1$ 線, $\text{CrK}\alpha_1$ 線, および $\text{FeK}\alpha_1$ 線を用いて得た 12 枚の (310), (211) および (220) 面回折線写真お

(1) 0.07% carbon steel by $\text{CoK}\alpha_1$ (310) radiation

(2) 0.07% carbon steel by $\text{CrK}\alpha_1$ (211) radiation

Table 2 Initial residual stress measurements for polished 0.07% carbon steel by

Used X-ray	Number	$\psi_0=0$					$\psi_0=15^\circ$				
		Radius of rad. by photo-meter (mm)	Changed into radius of rad. photo (mm)	Averaged radius of rad. photo (mm)	Diff. angle (degree)	Cosec θ_ψ	Radius of rad. by photo-meter (mm)	Changed into radius of rad. photo (mm)	Averaged radius of rad. photo (mm)	Diff. angle (degree)	Cosec θ_ψ
$\text{CoK}\alpha_1$	1	98.6	19.72	19.67	$80^\circ 31' 00''$	1.01385	97.2	19.44	19.41	$80^\circ 39' 00''$	1.01346
	2	98.4	19.68				97.2	19.44			
	3	98.4	19.68				97.0	19.40			
	4	98.2	19.64				97.0	19.40			
	5	98.2	19.64				97.0	19.40			
$\text{CrK}\alpha_1$	1	109.2	21.84	21.81	$78^\circ 00' 10''$	1.02234	108.4	21.68	21.65	$78^\circ 03' 00''$	1.02215
	2	109.2	21.84				108.4	21.68			
	3	109.0	21.80				108.2	21.64			
	4	109.0	21.80				108.2	21.64			
	5	109.0	21.80				108.2	21.64			
$\text{FeK}\alpha_1$	1	170.0	34.00	33.97	$72^\circ 54' 00''$	1.04625	168.6	33.72	33.70	$72^\circ 59' 00''$	1.04578
	2	169.8	33.96				168.6	33.72			
	3	169.8	33.96				168.5	33.70			
	4	169.8	33.96				168.4	33.68			
	5	169.8	33.96				168.4	33.68			

よび実際得られた、 ψ 側のマイクロフォートメータ曲線の一例を示したものである。また、実際マイクロフォートメータを用いて黒化度の自記曲線を求め、peak位置を求めて応力値を算出する場合において、マイクロ

フォートメータの slit の面積、すなわち、分解能の影響が問題となるため、この点につき検討を加えた結果の一例を Fig. 3 (b) に示す。Table 2 はこれらの実際の測定値の一例を示したものである。すなわち上述の結果よりわかるように、本実験の条件下においてはきわめて良好な精度において、 $\operatorname{cosec} \theta_{\psi}(d_{\psi})$ の値、いいかえれば応力値が求められることが理解される。Fig. 4 は Table 2 における結果を $\operatorname{cosec} \theta_{\psi} \sin^2 \psi$ の関係で示したものであって、きわめて良い直線性を示すことがわかる。なお図中の破線は最大誤差範囲を示したものであって、各々の場合において、Table 2 の右の欄に記したような精度において応力値が求められることが認められる。

(II) 実験 (B)

(i) 試験片 実験(B)に用いた試験片は0.13%炭素鋼であって、実験(A)の場合と同様、所定の形状寸法に仕上げ、860°Cで2時間焼なましを行なったのち、10%引張り加工を与えたものを加工材として採用した。試験片の形状および寸法は Fig. 1 (b) に示す。

three kinds of X-ray

(—maximum experimental error band)

$\psi_0=30^\circ$					$\psi_0=45^\circ$					Stress value (kg/mm ²)
Radius of rad. by photo-meter (mm)	Changed into radius of rad. photo (mm)	Averaged radius of rad. photo (mm)	Diff. angle (degree)	Cosec θ_{ψ}	Radius of rad. by photo-meter (mm)	Changed into radius of rad. photo (mm)	Averaged radius of rad. photo (mm)	Diff. angle (degree)	Cosec θ_{ψ}	
96.8	19.36	19.34 [+0.02 -0.02]	80°46'00'' [+30'' -30'']	1.01313 [+0.00002 -0.00002]	96.2	19.25	19.21 [+0.04 -0.04]	80°55'00'' [+1' -1'50'']	1.01269 [+0.00004 -0.00007]	-22.3 [+0.2 -0.3]
96.8	19.36				96.2	19.25				
96.6	19.36				96.0	19.20				
96.6	19.32				96.0	19.20				
96.6	19.32				95.8	19.18				
107.8	21.56	21.53 [+0.03 -0.02]	78°07'10'' [+30'' -30'']	1.02190 [+0.00003 -0.00003]	107.2	21.44	21.39 [+0.05 -0.03]	78°12'30'' [+1' -45'']	1.02156 [+0.00004 -0.00003]	-24.2 [+0.4 -0.2]
107.8	21.56				107.0	21.40				
107.6	21.52				107.0	21.40				
107.6	21.52				106.8	21.36				
107.6	21.52				106.8	21.36				
168.0	33.68	33.54 [+0.04 -0.02]	73°07'00'' [+45'' -15'']	1.04505 [+0.00007 -0.00003]	167.2	33.44	33.44 [+0.03 -0.05]	73°13'00'' [+30'' -1'15'']	1.04449 [+0.00005 -0.00003]	-29.8 [+0.5 -1.0]
167.8	33.56				167.2	33.44				
167.6	33.52				167.1	33.42				
167.6	33.52				167.1	33.40				
167.6	33.52				166.8	33.36

Fig. 3 (b) Analytical capability of micro photometer curve (0.07% carbon steel (Polished) by Co $K\alpha_1$ (310) radiation)

(): Maximum experimental error band

Fig. 4 Examination of accuracy for stress measurement by three sorts of characteristic X-ray

(b) for corrosion method

Fig. 1 Specimen

Fig. 5 Stress corrosion apparatus

a: Cooling pipe
b: Specimen holder
c: Specimen
d: Mirror
e: Scope
f: Scale

(ii) 腐食法による残留応力測定およびX線による応力測定

(a) 腐食法による残留応力の測定

残留応力の測定には、普通一般に用いられている腐食法を採用した。すなわち、腐食液としては15%硝酸溶液を採用し、一定時間内の腐食に伴って生じる試験片の曲率の変化を Fig. 5 に示すような装置を用いて測定し、次式により残留応力の値を計算で求めた。

$$\sigma = Co \left(t^2 \frac{dx}{dh} - 4xt + 2 \int_0^h x dh \right) \quad (2)$$

$$Co = \frac{E}{12Lg}$$

σ : 任意の腐食後の厚さ t における残留応力 (kg/mm²)

t : σ を計算しようとする層の厚さ (mm)

$$t = t_0 - h$$

t_0 : 腐食前の試験片の厚さ (mm)

h : 任意の腐食層の厚さ (mm)

x : スケールの読み (mm)

E : 弾性定数 (kg/mm²)

L : 鏡とスケール間の距離 (mm)

g : 腐食部分の長さ (mm)

あらかじめ実験材料と同一材料を用い、15%硝酸溶液にて一定時間腐食させて、腐食時間-腐食厚さ線図を求めておく。

試験片③を保持装置に取り付け、測定しようとする面の標点部分を除く他の全面に、耐酸塗料(エポキシポリアミド)を塗布した。水槽内の試験片と、これに垂直に取りつけた鏡および望遠鏡の軸線が、同一直線上に並ぶよう調整し、徐々に硝酸溶液を流し込み、試験片が充分浸漬したのを確かめたのち、直ちに測定を開始した。測定間隔は5分間隔とし、腐食による試験片の曲率の変化をスケールで読み、 $x-h$ 曲線をグラフ上に求めた。

応力計算には、この $x-h$ 曲線を用いた。すなわち、(2)式右辺の微分値はこの曲線のこう配の正切により、積分値はグラフ上の目盛りより求め、これらより(2)式にて応力値を計算した。

なおこの場合、室温の変化および腐食による発熱のために液温が上昇するのを防止する目的で、冷却管①を槽中に設置し、また試験片の長さ方向の両側に攪拌棒を設け、モーターから減速装置およびプーリーを経て、攪拌棒を回転させることにより、液の各部における発熱および腐食生成物の停滞を防いだ。

(b) X線による応力測定方法

X線による応力測定方法は、実験[A]の場合と同様、(i)-(iii)において述べた方法を採用して行なった。すなわち、腐食による表面除去の任意の各段階において

試験片を槽中より取り出し, $\text{CoK}\alpha_1(310)$, $\text{CrK}\alpha_1(211)$, および $\text{FeK}\alpha_1(220)$ 面各回折線を用いて, $\sin^2\psi$ 法を用いて応力値を求めた。

3. 実験結果

Fig. 6~10 は, 実験〔A〕における結果を示したものである。すなわち, Fig. 6~8 は 0.07% 炭素鋼焼なまし材に順次曲げ応力に加え, その各応力段階において $\text{CoK}\alpha_1$ 線, $\text{CrK}\alpha_1$ 線, および $\text{FeK}\alpha_1$ 線を入射して得られる (310), (211) および (220) 面の回折線より求められる格子面間隔の変化を $\text{cosec}\theta_\psi - \sin^2\psi$ の関係で示したものである。すなわち, $\text{CoK}\alpha_1$, $\text{CrK}\alpha_1$ および $\text{FeK}\alpha_1$ を用いて (310), (211) および (220) 面回折

線より求めた $\text{cosec}\theta_\psi - \sin^2\psi$ の関係はともにきわめてよい直線関係が存在することが認められる。またこれらの場合, 各測定点における負荷応力値と X 線により測定した応力値とを同時に図中に表示した。すなわち, これらの表から, (負荷応力値 + 初期圧縮残留応力値) と任意の機械的負荷応力段階において, X 線により求めた応力値との間の関係は, わずかな誤差範囲内できわめてよい一致を示した。

Fig. 9 は上述の結果を図示したもので, 弾性範囲内の負荷応力値に対し, きわめてよい直線関係が存在することが認められる。Fig. 10 は 0.07% 炭素鋼研摩材に対して, 上記と同様の実験を行なった場合の結果を示したものである。この場合においても, 焼なまし材の場合と同様きわめてよい直線関係が存在することが認められる。すなわち, X 線による応力測定値がきわめて信頼度の高いことが理解できる。

Fig. 9 および Fig. 10 において特に注目すべきことは, X 線により求めた初期の残留応力値に対しては,

Fig. 6 Plot of $\text{cosec}\theta_\psi$ vs. $\sin^2\psi$ for a sample of annealed 0.07% carbon steel mechanically stressed in the range of about 0 to 25 kg/mm²

Fig. 7 Plot of $\text{cosec}\theta_\psi$ vs. $\sin^2\psi$ for a sample of annealed 0.07% carbon steel mechanically stressed in the range of about 0 to 25 kg/mm²

Fig. 8 Plot of $\text{cosec}\theta_\psi$ vs. $\sin^2\psi$ for a sample of annealed 0.07% carbon steel mechanically stressed in the range of about 0 to 25 kg/mm²

Fig. 9 Correlation of X-ray and dial gage stress measurements for annealed 0.07% carbon steel

測定に用いた格子面により明りょうな依存性が存在することが認められるが、これに弾性範囲内の機械的な応力を負荷した場合の負荷応力値（機械的負荷応力+X線により求めた残留応力値）とX線により求めた表面応力値とは、測定に用いる格子面が異なっても、それぞれ平行なよい直線関係を示すこと、すなわち回折面の依存性を示さないことである。

Fig. 11 は、0.13%炭素鋼焼なまし材に順次引張変形を与え、除荷した際に試験片表面に生ずる残留応力を $\text{CoK}\alpha_1$ 線、 $\text{CrK}\alpha_1$ 線、および $\text{FeK}\alpha_1$ 線を用いて測定した結果を残留応力値と伸び(%)の関係で示したものである。試験片に塑性変形を与えると、負荷応力と反対符号の残留応力が発生し、負荷応力が増加するに伴い、除荷した際に生ずる残留応力はある程度増加する。本実験結果において、3種類の特性X線を使用して得られる(310)、(211)、および(220)面回折線より求めた応力値は、引張応力と逆符号の残留応力値を示すことが認められた。この場合において、 $\text{CoK}\alpha_1$ 線による(310)面回折線およびCrによる(211)面回折線による測定値は、伸び(%)に対して、ほぼ比例的な関係が認められるが、 $\text{FeK}\alpha_1$ 線による(220)面回折線より

Fig. 10 Correlation of X-ray and dial gage stress measurements for polished 0.07% carbon steel

Fig. 11 Correlation of X-ray stress measurements and plastic deformation for 0.13% carbon steel

求めた応力値は異常な傾向を示す。

Fig. 12 および Fig. 13 は実験[B]において得られた結果、すなわち、X線および腐食法の両者により求めた残留応力値を腐食除去厚さとの関係で示したものである。すなわち、図中白2重丸は腐食法により、測定開始後5分間ごとの腐食層*t*における残留応力の測定値を示し、白丸、半黒丸および黒丸はそれぞれ(310)(211)および(220)面より求めたX線の応力測定値を示す。またこの場合、腐食による表面除去の過程において、各段階で表面の残留応力をX線で測定する場合は、表面を除くことによる応力解放の影響があって、除去前の残留応力を示さない。したがって、腐食法で求めた残留応力値とX線により求めた残留応力値は当然異なってくる。すなわち、腐食により試料表面の応力は一様に解放されるが、試験片断面の中立軸の変位に基づき、新しく加わる応力を加算した残留応力をX線で測定していることになる。これは、前記(2)式において右辺第1項に相当する。したがって、この両者において腐食法による測定値とX線の応力測定値の対応を求めた。すなわち、Fig. 12 および Fig. 13 において破線で示したのが、X線の応力測定値に対応する補正曲線である。

これらの実験結果において、腐食法により試験片表面を除去していく段階で、X線的に求めた応力値は、各回折面により異なった値を示しており、 $\text{CoK}\alpha_1$ 線

Fig. 12 Correlation of X-ray and corrosion residual stress measurements for cold worked 0.13% carbon steel

Fig. 13 Correlation of X-ray and corrosion residual stress measurements for cold worked 0.13% carbon steel

(310) 面回折線より求めた応力値が引張側に常に高い値を示し, $\text{CrK}\alpha_1$ 線 (211) 面回折線, $\text{FeK}\alpha_1$ 線 (220) 面回折線のそれぞれより求めた応力値がこれに次ぐ低い値を示している. すなわち, 明らかに回折面の依存性が存在することが認められ, しかもこれらの場合, $\text{CoK}\alpha_1$ 線による (310) 面回折線を用いて測定した場合が, 前記補正曲線とほぼ一致した値を示すことが認められる.

4. 考 察

X線によって応力を測定する場合, 測定に用いる格子面からの回折線の差異が, 求める応力値に及ぼす影響については, これまでも二, 三の研究が報告されているが, 残留応力の発生は金属材料の変形の機構およびこれに基づく micro-stress などと密接な関係が存在するものと考えられるので, この問題に対しては簡単に結論を下すことはなほ危険である. したがって, 本論文においては従来の研究結果との関係において, 前述の実験結果を定性的に説明することにする.

Fig. 9, 10 に示したように, 試験片に弾性範囲内の負荷応力が作用する際に, 負荷応力の値をX線的に求める場合には, 用いる特性X線の種類および測定する格子面が異なっても, 求めた応力値にほとんど差が認められない. しかしながら, 塑性変形を与えた状態すなわち初期の残留応力の値には, 明らかに回折面の依存性が認められる. この問題については筆者らは現在次のように考えている.

普通金属材料は弾性および塑性的に異方性を有するきわめて小さい (10^{-2} 程度の) 結晶粒の集合体であるが, 巨視的には一応弾性的等方体と考えることができる. したがって, このような金属多結晶体に弾性範囲内の外応力が作用すれば, 個々の結晶粒を構成する結晶格子も, 一応弾性的等方体としてひずみを受けることが考えられる. したがって, 材料に弾性範囲内の応力を漸次加えていく過程においては, (310), (211) および (220) 面より求めた応力値には差異を生じないものと考えられる. しかしながら, 金属結晶の変形機構に関する従来の研究結果に見るように, 金属結晶は塑性変形に対してはきわめて明りょうな異方性を示すことが明らかにされている. したがって, このような状態においては, (310), (211) および (220) 面などの結晶格子面間隔にはおのずから, 方向によって差異を生ずることが予想される. このように考えれば, Fig. 9, 10 における残留応力の初期値の相違, すなわち回折面の

依存性は一応理解できる.

次に, Fig. 11 の塑性変形の進行過程における (220) 面回折線より求めた残留応力の値の異常現象に対しては, (220) 面が結晶学的に体心立方格子のすべり面 (110) 面と等価である点から考え, 塑性変形の進行に伴ってこの面が最も異常を示し, 他の結晶面すなわち (310), (211) 等より求めた残留応力値に比べ, 異常値を示す可能性のあるものと考えられる. このような解釈をすれば, Fig. 12 の実験結果すなわちすべりの影響を直接受けないものと考えられる, (310) および (211) 格子面より測定した残留応力値が腐食法により求めた結果とよい一致を示すものと考えられる.

回折面依存性の問題を完全に説明するには, 今後更に詳細な研究が必要であることは言うまでもないが, 本研究の第一目的が緒論において述べたように, X線による応力測定法の工学的応用にあるため, 本問題の本質的な解明は後報に譲ることとする.

5. 結 論

以上述べた実験結果より大略次のように結論される.

(1) Table 1, Fig. 3 および Fig. 4 において示されるように, X線の撮影条件および筆者らが用いた測定方法を採用すれば, きわめて精度の高い応力値を求めることができる.

(2) 試験片に弾性範囲内の負荷応力が作用する際に, 負荷応力の値をX線的に求める場合は, 測定する格子面が異なっても, 求める応力値には差異は認められない. しかしながら, 試験片に保持されている残留応力値に関しては明りょうな回折面依存性を示す.

(3) X線を用いて残留応力を測定する場合においては被測定物の種類により, 適当なX線の種類, および測定する格子面を変化させる必要があるが, この場合回折面による依存性を考慮に入れるべきであり, これらの影響の少ない格子面を選んで, 測定を行なう必要がある.

参 考 文 献

- 1), 3) 平, 有間, 日本機械学会第 39 期通常講演会前刷集 (1962)
- 2) A.M. Christenson, E.S. Rowland, Trans. ASM, 145, (1953)
- 4) Handbuch. der Sonder Stahl Runde, 7, (1943)
- 5) 平, 村上, 材料試験, 7, 62, 591 (1958)
- 6) R.G. Treuting, and W.T. Read, J. Applied Physics (1951)
- 7) Möller und H. Brasse, H. Archiv. Eisenhütten. W, 231 (1955)
- 8), 10) V. Hauk, Arch. Eisenhütten. W, 26, 275 (1955)
- 9) G.B. Grénough, J. I.S. Inst., (1951)