

論 說

冷間引拔鋼棒の研究 (第1報)\*  
冷間引拔炭素鋼棒の残留歪のX線的研究

高 瀬 孝 次\*\*  
亘 理 達 郎\*\*

STUDIES ON THE COLD-DRAWN STEEL BARS (REPORT I): AN X-RAY STUDY  
OF RESIDUAL STRAINS IN COLD-DRAWN CARBON STEEL BARS.

*Koji Takase and Tatsuro Watari.*

*SYNOPSIS:*—During the cold-drawing process, metallic materials are subjected to various changes in their mechanical properties due to the accumulation of residual strains. Some considerations on the cause of such changes were made in the present report by means of the X-ray analysis, which was performed by the back-reflection-focussing method concerning various kinds of cold-drawn carbon steel bars. Results of the experiment were as follows:

- 1) Residual strains of the first kind, having the small gradient of strain distribution, increase very rapidly in the specimen subjected to the reduction between 0 and 15%, then slowly and finally reach the saturated state when the reduction rate exceeds 20%.
- 2) The saturated residual strains show the higher value as the carbon content of the cold-drawn bar increases.
- 3) Residual strains of the second kind, having the large gradient of strain distribution, increase rapidly in the specimens subjected to the reduction between 0 and 15%, and then slowly up to the maximum reduction of 30%.
- 4) Residual strains of the second kind in some specimens with a certain reduction rate always show the higher value as the carbon content of cold-drawn bar increases.

1. 緒 言

金属材料に冷間加工を施すと、其の機械的性質が著しく變化する。例へば鋼棒は冷間引拔加工により其の抗張力、硬度を増加し、伸は逆に減少する事が知られて居る。然しこれ等の機械的性質の變化と、加工率の關係は複雑であつて、これを理論的に決定する事は不可能で、理論的に目安を定めると云ふ事すらも餘り行はれて居ない。然るに冷間加工に依て金属材料内に残留歪が蓄積する事は衆知の事實であつて、残留歪發生の程度並にその分布の様式が、金属材料の機械的性質の變化を定める一つの重要な因子である事は充分考へ得る。残留歪には後述する如く第一種及第二種の二種類があつて、これ等が各々異た性質變化を金属材料に與へる。依て兩種の残留歪發生の様子の測定結果と

機械的試験結果とを比較すると、冷間加工に對して、何等かの基礎的考察が行ひ得ると思はれたので、引拔炭素鋼棒の残留歪のX線の測定を実施した。其の結果の一部を本報に述べる。

2. 第一種の残留歪

金属材料が加工を受けると、材料の各部分は先づ彈性變形を起し、彈性限を越した部分より順次塑性變形を起す。加工の途中に於ては、種々の複雑した應力分布が起り、加工後に於てもこれ等の應力は消滅する事なく、引張歪力及び壓縮歪力として残留する。而して實際上、加工せる金属材料は一定の外形を保て居るので、これ等の歪力は當然平衡の状態にある筈である。即ち加工材料の一部を除去すると、殘部が自然に變形を起す事があるのは、残留歪の平衡が破れた爲である。以上の如き潜伏せる歪力の原因とな

\* 講演番號 35    \*\* 陸軍航空技術研究所

る歪を残留歪と云ひ、この残留歪は加工材料の廣範圍に亘て連続的に分布して居るので、特に第一種の残留歪と呼ばれる。第一種の残留歪の存在は Heyn<sup>1)</sup> に依て始めて明かにされた。同氏はニツケル鋼棒を牽引後、其の一部を外周より漸次旋削せるに、棒は次第に膨脹するを認め、即ち牽引棒の外周部は牽引方向に引張残留歪を、中央部は壓縮残留歪を有し、外周部と中央部の歪力が互に平衡を保て居る。冷間引抜棒もこれと大略同様な残留歪分布を有して居て、上田氏<sup>2)</sup>の實驗に依ても明らかにされて居る。

斯の如く第一種の残留歪は材料の肉眼的領域に於て徐々に變化する分布様式を有し、歪分布の勾配は極めて小である。残留歪を X 線的に測定する場合には、主として Debye-Scherrer 法を使用するのであるが、此の場合 X 線を入射せしめる領域の第一種の残留歪は、殆んど一定なりと考へられる。今第一種の残留歪が発生した結果、X 線を入射する領域中の格子面間距離  $d$  が一様に  $\Delta d$  だけ變化して居るとすると、Bragg の式

$$n\lambda = 2d \sin\theta \dots \dots \dots (1)$$

より

$$\epsilon = \Delta d/d = -\cot\theta \Delta\theta \dots \dots \dots (2)$$

なる關係式が得られる。但し  $\epsilon$  は残留歪である。即ち第一種の残留歪の X 線的測定法は廻折線の線間距離の精密測定に依て行ひ得るのであつて、この測定法は Glocker 一派に依て大成され、第一種の残留歪の主要歪力の測定迄可能にされて居る。この研究は我國に於ても活潑に行はれて居り、例へば志村、一色兩氏<sup>3)</sup>の報文に依ても其の概要を知る事が出来る。

第一種の残留歪が引抜棒の機械的性質に及ぼす影響を考へて見る。焼鈍状態にある棒を、歪を受けて居ない安定状態の螺線バネ系と考へると、引抜棒は上田氏の實驗結果が示す如く、壓縮された螺線バネが、外周より引伸された螺線バネで押へられて平衡を保て居る擬安定のバネ系に喩へられる。斯る擬安定のバネ系は、安定なバネ系よりも外力に對して抵抗力があると同様に、引抜棒は焼鈍棒に比して遙に外力に抵抗があると考へられる。然し擬安定のバネ系は、其の一部を除くと、直ちに變形を起して、新しい擬安定の状態に移る如く、引抜棒は其の一部を除くと、歪力の

平衡が破れて、歪力が新しい平衡状態に達する迄變形する。例へば棒の側腹に切溝を附すと、棒は切溝の反對側に彎曲する。即ち著しく切溝に對して鋭敏となる。

尙特記すべきは、純粹な第一種の残留歪の發生に依ては、加工材料全體としての機械的性質のみが變化するのであつて、その材料の本質的な機械的性質は變化しないと云ふ事である。先に述べたバネ系を再び喩へとせば、安定系でも、擬安定系でも、バネの一小部分を取り出して比較せば兩者共に全く同一の性質を示すのである。勿論斯る簡單な第一種の残留歪の機構を以て、引抜棒の詳細な機械的性質の變化を推論するのは暴舉であるが、定性的には便利な考へ方であると思ふ。

### 3. 第二種の残留歪

金屬材料が冷間加工を受けると、前述せる如く、第一種の残留歪の發生に依て、廻折線の線間距離に變化を生ずると同時に、廻折線自身の幅が廣くなる。この現象は最初 A.E.vanArkel に依て發見された。Dehlinger<sup>5)</sup>はこの現象は結晶格子の不齊化に依て起り、結晶格子が極めて小なる領域を單位として種々の残留歪を受けて居るためとし、この種の残留歪に起因する歪力を潜在弾性歪力 (Verborgte elastische Spannungen) と名附けた。この残留歪を前述の第一種の残留歪と區別するため、通常第二種の残留歪と云ふ。

第二種の残留歪の本質に關しては、種々の議論がある。然しこれを大別すると、格子の不齊化が週期的に起て居るとする見解 (Distortions of a periodic type) と全く不規則に起て居るとする見解 (Distortions of a non-periodic type) との二種類になる。以下これ等の見解の大略を記して見る。

(i) 格子の週期的不齊化説 この説は Dehlinger<sup>5)</sup>に依て最初に提出された。彼は格子面に於て原子が正規位置より餘弦函数的に周期變位をして居るとし、この假定より廻折線幅が増大する事を説明し得た。但し彼は廻折 X 線の全積算強度 (Total integrated intensity) (5. (12) 式参照) には變化なしとの結論を得て居る。又 Kochendorfer<sup>7)</sup>は Dehlinger の理論より、廻折線幅と第二種の残留歪との關係を求めて居る。同様の假定より

<sup>1)</sup> Materialienkunde für den Maschinenbau, Berlin Julius Springer 1912, 285.

<sup>2)</sup> 日本金屬學會誌 3, 昭和 14 年, 137.

<sup>3)</sup> 日本鑛業會誌 53, 昭和 12 年, 413.

<sup>4)</sup> 日本鑛業會誌 54, 昭和 13 年, 569.

<sup>5)</sup> Z. f. Kristallogr. 65, 1927, 615.

<sup>6)</sup> Z. f. Metallkunde 23, 1931, 147.

<sup>7)</sup> Z. f. Kristallogr. 65, 1937, 615.

Hengstenberg 及 Mark<sup>8)</sup>) は Dehlinger と逆に、全積算強度に変化を生ずるも廻折線幅には変化を與へぬとの結論を出して居り、この矛盾に對して Brill 及 Renninger<sup>10)</sup> の討論がある。一方 Boas<sup>11)</sup> は所謂 rechteckig periodisch verteilte Störungen 説を提唱して居る。即ち一つの格子面を同数の原子よりなる小正方領域に細分しこの小領域が正規の格子面より垂直に Fourier 函数的に周期變位をして居ると云ふ考へで、この説より廻折線の全積算強度は變化するも、幅の増大は僅小であるとの結論を得て居る。Dehlinger<sup>12)</sup> は自説を主張して Boas の如き歪機構は不安定なりとして居る。

以上の如く格子の周期的不齊化説は、今尙決定的結論に到らず Brill 及 Renninger<sup>10)</sup> の指摘せる如く、幅の増大と全積算強度の變化との同時測定は未だ殆んど行はれて居ない。これに關聯した研究として、纔に Brindly<sup>13)</sup> の報文があるのみである。

(ii) 格子の不規則的不齊化説 この説は前説と逆に歪分布がコロイド的領域を單位として全く不規則に起て居るとしてゐる。換言せば X 線を入射せしめる領域に比して、遙に小なる領域を單位として、第一種の残留歪と同種の歪分布が起て居ると考へる。この場合残留歪の分布は第一種の場合に比して著しく大なる勾配を有して居るので、其れが機械的性質に及ぼす影響は、第一種の残留歪に比して遙かに本質的であつて、且著しい筈である。

不規則的不齊化説は議論の根底をなす假説が餘り定性的であるので、理論的興味を呼ばぬ爲か、深く検討した論文が尠い。

#### 4. 第二種の残留歪と機械的性質の關係

前節で述べた如く、第二種の残留歪は、結晶粒中の極小領域を單位として分布して居る。従て此の種の残留歪は格子面を不齊化して居り、結晶粒の迂り抵抗を増大せしめる原因となる。定性的に述べると、格子面を複雑に彎曲せしめ、格子面の迂りを困難にする。故に金属材料に第二種の残留歪が発生すると、材料を根本的に硬化せしめ、外力に對する抵抗力が増大し、硬度の上昇、加工性の低下が豫

想される。この現象は加工に於て常に認められる所のものである。又金屬の内部摩擦を變化せしめる事も豫想され、従て振動減衰能とも密接な關係があり<sup>14)</sup>、第二種の残留歪は或種の條件下では減衰能を増加せしめると云ふ事が考へられる。従て疲労現象とも密接な關聯を有すると豫想される。事實加工を施した材料は、疲労限界の變化を示す事が認められて居る。以上の如く第二種の残留歪といふものは、金属材料の機械的性質と重大なる關係を有するのである。

#### 5. 第二種の残留歪と廻折線幅の關係

前述せる如く、第二種の残留歪は X 線を入射せしめる領域に於て、壓縮歪より引張歪に互る種々の大きさを以て複雑に分布して居るのであつて、第二種の残留歪の發生程度を比較する場合には、其の平均を以てしなくてはならない。此所に注意すべきは、純粹なる第二種の残留歪のみを有する領域に於ては、壓縮残留歪の平均と、引張残留歪の平均とは、絶對値相等しく、符號相反對で、總和は零となる事である。依て第二種の残留歪の程度を表はすには、壓縮、引張孰れの残留歪の平均を以てしてもよいのであつて、この平均を、平均第二種残留歪と名附ける。

X 線の入射する領域を N 等分し、この各々を便宜上單位微晶と名附ける。而して N を次第に大きくして、單位微晶中の残留歪  $\epsilon$  は一定なりと考へ得る程度に到らしめる。この時残留歪  $\epsilon$  なる單位微晶の數を  $n(\epsilon)$  で表はすと、

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} n(\epsilon) d\epsilon \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = 2/N \cdot \int_0^{\infty} \epsilon n(\epsilon) d\epsilon \dots\dots\dots (4)$$

を以て、平均第二種残留歪  $\phi$  を定義する。

(4) 式を計算するために、次の二つの假定を設ける。

I. 格子面の反射能は残留歪に依て變化しない。即ち残留歪  $\epsilon$  を有する  $n(\epsilon)$  個の單位微晶から廻折する X 線の強度 I は

$$I = c n(\epsilon) \quad c: \text{常數} \dots\dots\dots (5)$$

で表はし得る。

II. 歪の空間的分布様式より、歪の大きさの統計的分布函數  $n(\epsilon)$  を求めると、 $n(\epsilon)$  は、

$$n(\epsilon) = n(0) \exp. -k\epsilon^2 \quad k: \text{常數} \dots\dots\dots (6)$$

<sup>14)</sup> Zener: Phys. Rev. 53, 1938, 582.

<sup>8)</sup> Z. f. Physik 61, 1930, 465.

<sup>9)</sup> Ergebn. techn. Röntgenkunde 2, 1931, 139.

<sup>10)</sup> Ergebn. techn. Röntgenkunde 6, 1938, 153~154.

<sup>11)</sup> Z. f. Kristallogr. 97, 1937, 354.

<sup>12)</sup> Z. f. Metallkunde 31, 1939, 231.

<sup>13)</sup> Proc. Phys. Soc. 51, 1939, 432.



なる確率函数で表し得る\*。

この場合には、(3)式は

$$N = n(0)(\pi/k)^{-1/2}$$

となり、(4)式で定義した平均第二種残留歪 $\phi$ は

$$\phi = (\pi k)^{-1/2} \dots \dots \dots (7)$$

で與へられる。

次に残留歪 $\epsilon$ を有する單位微晶の廻折 X 線の廻折角の變化  $\Delta\theta$  は、(2)式より、

$$\Delta\theta = -\epsilon \tan\theta \dots \dots \dots (8)$$

となる。廻折 X 線の最高強度位置より  $\Delta\theta$  だけ離れた方向の廻折 X 線強度を  $I_{\Delta\theta}$  で表はすと、(5)式より

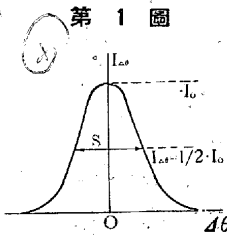
$$I_{\Delta\theta} = cn(\epsilon) \dots \dots \dots (9)$$

依て(6)、(8)及(9)式より

$$I_{\Delta\theta} = cn(0) \exp. -k \cot^2\theta (\Delta\theta)^2 \\ = I_0 \exp. -k' (\Delta\theta)^2 \dots \dots \dots (10)$$

但し

$$k' = k \cot^2\theta \dots \dots \dots (11)$$



第 1 圖

である。(10)式を曲線で表はすと、第1圖の如くなる。今曲線と  $\Delta\theta$  軸の間の面積乃ち全積算強度を A とすると、

$$A = 2I_0 \int_0^\infty \exp. -k' (\Delta\theta)^2 d(\Delta\theta) \\ = I_0 (\pi/k')^{1/2} \dots \dots \dots (12)$$

依て(7)、(11)及(12)式より

$$\phi = \cot\theta / \pi \cdot (A/I_0) \dots \dots \dots (13)$$

が得られる。又第1圖の如く  $I_{\Delta\theta} = 1/2 \cdot I_0$  なる點の幅、乃ち半價幅を S とすると、(10)式により

$$S = 2(\log_e 2/k')^{1/2} \dots \dots \dots (14)$$

依て(12)、(14)式より、

$$S/(A/I_0) = 2(\log_e 2/\pi)^{1/2} \dots \dots \dots (15)$$

が得られ、(13)、(15)式より  $(A/I_0)$  を消去すると、

$$S = 2(\log_e 2/\pi)^{1/2} \pi \phi \tan\theta \dots \dots \dots (16)$$

が得られる\*。

### 6. (13) 及 (16) 式より平均第二種残留歪の測定式の誘導及測定式に対する考察

(13)式に於て  $\phi = 0$ 、即ち焼鈍試料を使用した場合を考へると、 $(A/I_0) = 0$ 、即ち廻折線幅は無限に狭くなり、 $\Delta\theta = 0$  の方向の廻折線の強度は無限に大となる。依て  $\phi = 0$  の時の  $(A/I_0)$  を實驗的に定め、この値を  $(A/I_0)_a$  とする。 $(A/I_0)_a$  は Scherrer の結晶粒の大きさ L と、廻折線幅 B の関係式\*\* の b 項に相當するものである。乃ち(13)式は

$$(A/I_0) = \pi \phi \tan\theta + (A/I_0)_a \dots \dots (20)$$

となり、同様にして、(14)式は

$$S = 2(\log_e 2/\pi)^{1/2} \cdot \pi \phi \tan\theta + S_a \dots (21)$$

となる\*\*\*。但し  $S_a$  は焼鈍試料より得られる廻折線の半價幅である。

乃ち(20)、(21)の兩式は、孰れも廻折線の強度曲線の解析\*\*\*\* より、

\* 第二種の残留歪の平均を表はすに

$$S = 2\Delta\theta \dots \dots \dots (17)$$

に相應する残留歪  $\phi'$  を以てすることがある。この場合は(2)及(17)式より簡単に、

$$S = 2\phi' \tan\theta \dots \dots \dots (18)$$

となる。此所に於て  $\phi'$  は  $n(\epsilon)$  が(6)式で表し得る場合には

$$n(\phi') = 1/2 \cdot n(0)$$

を満足する  $\phi'$  の値で(16)、(18)式より

$$\phi' = (\pi \log_e 2)^{1/2} \cdot \phi$$

なる關係式が得られる。

\*\*  $B = 2(\log_e 2/\pi)^{1/2} \cdot \lambda/L \cdot \sec\theta + b(\lambda: 波長) \dots \dots \dots (19)$

\*\*\* (19)、(21)の兩式を比較すると、結晶粒の微細度  $1/L$  と  $\phi$  とに依る廻折線幅の變化様式が異なる事が知られる。前者は  $\sec\theta$  後者は  $\tan\theta$  に比例して増大するので、 $\theta$  小なる方向の廻折線に對しては、微細度  $1/L$  の影響が、平均第二種の残留歪  $\phi$  による影響より大きく現れる。

\*\*\*\* (20)、(21)の兩式に於ける  $(A/I_0)$  及 S は、廻折角を尺度としたラザアン單位で表はしてあるから、解析の時注意を要する。

\* 残留歪を受けた状態は、内部エネルギーの増大した状態であつて、分子の内部エネルギー分布は通常 Maxwell の法則に従ひ Gauss の確率線分で表はされるので  $n(\epsilon)$  の函数型も同様 Gauss の確率曲線で表はし得ると考へる事が出来る。

平均第二種残留歪の測定の可能性を示すものである.\*

### 7. 冷間引抜鋼棒の中心部の

#### 残留歪の測定実験

(1) 試料の調製 陸海航空材料規格 25 炭素鋼棒, 35 炭素鋼棒, 45 炭素鋼棒及 55 炭素鋼棒の4種類を試料として使用した. 其の分析結果を第1表に掲ぐ.

第 1 表

	C	Si	Mn	P	S
25 炭素鋼棒	0.27	0.15	0.48	0.015	0.019
35 炭素鋼棒	0.38	0.34	0.60	0.017	0.016
45 炭素鋼棒	0.44	0.35	0.50	0.025	0.029
55 炭素鋼棒	0.55	0.31	0.51	0.012	0.021

冷間引抜工程は次の如し. 素材として熱間延棒(直径 21mm×2m)を使用し, その一端を加熱鍛伸して引口を作り, 素材全部を石炭爐にて 800°C に 1 時間保熱後空中放冷す. 次で酸槽に浸漬し, Scale を除去し Draw bench に依り引抜き, 直径 20mm(+0.02, -0.00) となし, 矯正機により直棒とした後, 再び石炭爐にて材料裸の儘 800°C 1 時間保熱後空中冷却し, 稀硫酸(45°C)にて酸洗後石灰液にて脱酸, 水洗後乾燥し, 焼鈍試料となす. 次で断面収縮率 5% づゝ 30%迄の6種の冷間引抜試料を作る.

引抜棒の中央部より, 軸長 10mm の試料を棒軸に垂直に切断し, 切断面を研磨し, 側面をパラフィンで被覆後, 切断面のみを 6NHNO<sub>3</sub> にて約 1mm 酸蝕除去す.

(2) 廻折線の撮影及廻折線の解析 以上の如くして切断による加工層を除去した試料の切断面の中心部に, 垂直に Co 特性 X 線を入射せしめ, 集注法背面反射カメラ<sup>3)</sup>に依て(310)廻折線を撮影す. 撮影條件は 40kV 5mA 30 分で 0~30% 加工率の7個の試料に就て連続して行ふ.(寫真1参照)撮影後7枚同時に現象, 定着, 水洗し, 乾燥後のフィルムに依る影響を除く様注意を拂た.

線間距離及廻折線の強度曲線の測定は, コンパレーター

\* (20), (21)の兩式は純粹な第二種の残留歪の時のみ成立するのであつて, 第一種の残留歪が共存する場合には, φの意味が異なる. εI なる第一種の残留歪が共存すると,

(20)式は,

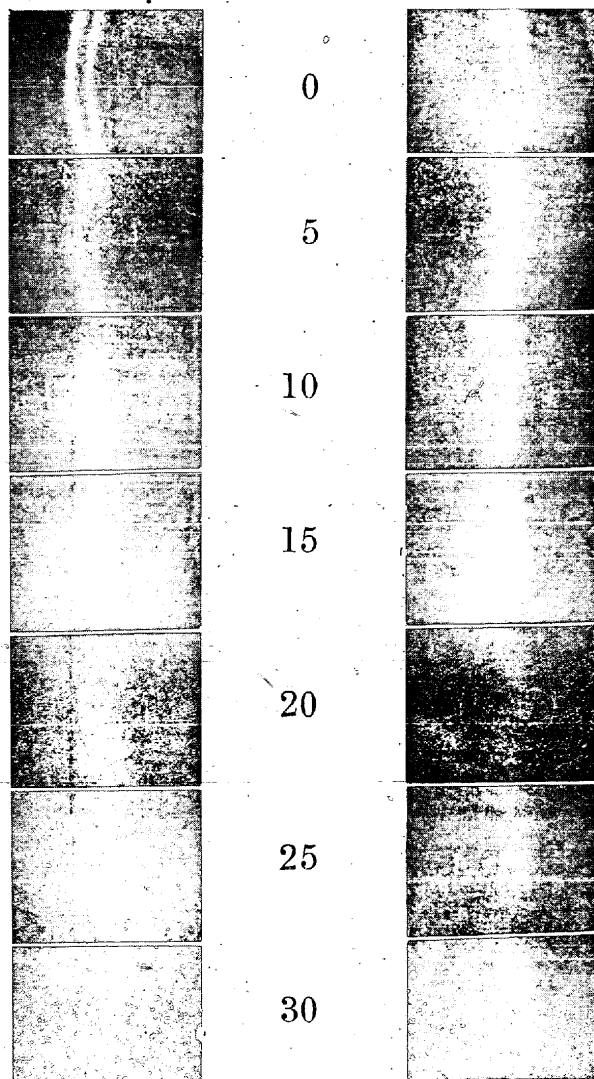
$$(A/I_0) = \pi\phi'' \tan(\theta - \epsilon I \tan\theta) + (A/I_0)_a \dots (20')$$

となり. φ'' は εI を中心とした第二種の残留歪の偏差の平均を表はす. 然し(20')に於て θ ≫ εI tanθ であるので, φも φ'' も相等しいと見做し得る. 依て φも φ'' も共に平均第二種残留歪と呼ぶ事にして, (20)及(21)式を平均第二種の残留歪の測定式として専用する事にする.

型マイクロフォトメーターに依た. 線間距離は, マイクロフォトメーターの検流計の振れに依て廻折線の最高強度位置を直接知る事が出来るので, 正確に 1/50 mm 迄測定出来る. 強度曲線は検流計及コンパレーターの読みを「ぐらふ」に畫く事に依て求められる. この場合フィルム地が散亂 X 線に依てかぶつて居るので, 第2圖a 曲線の如くなる. 依てこれからかぶりの影響を除いて, 第2圖b の如き補正曲線を求める.

かくして得た強度曲線は Kα<sub>1</sub> 及 Kα<sub>2</sub> が重複して居るので, この解析を行ふ. この場合 Kα<sub>1</sub> と Kα<sub>2</sub> の強度比が 2:1 なる事に着目して, 次の如く解析を行ふ. 即ち第3圖の如く, 曲線の裾を A, B とし, A, B の中點を O とすると OC:OD:ON=1:2:3 なる事に注目して C D の二點を定め, 次で A' 及び B' を圖の如く AM<sub>1</sub>=M<sub>1</sub>A', BM<sub>2</sub>=M<sub>2</sub>B' の如く求めると, 強度曲線は容易に二つに分

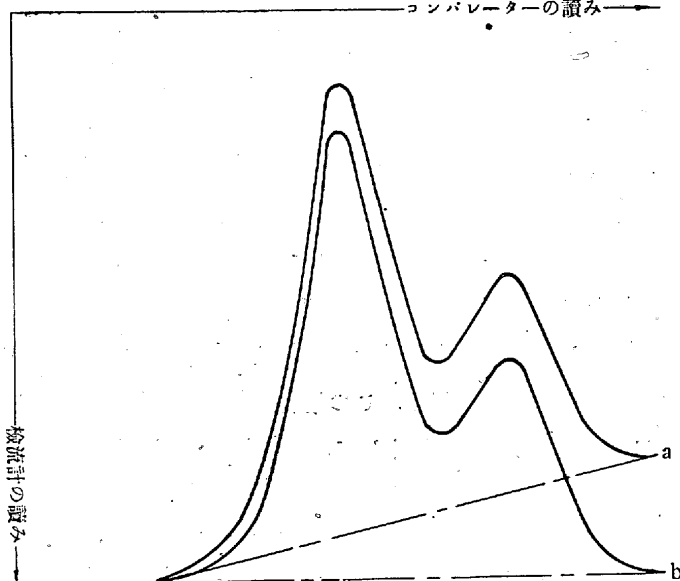
寫真 1 45 炭素鋼棒  
引抜加工率 (%)



(40kV 5mA 30min)

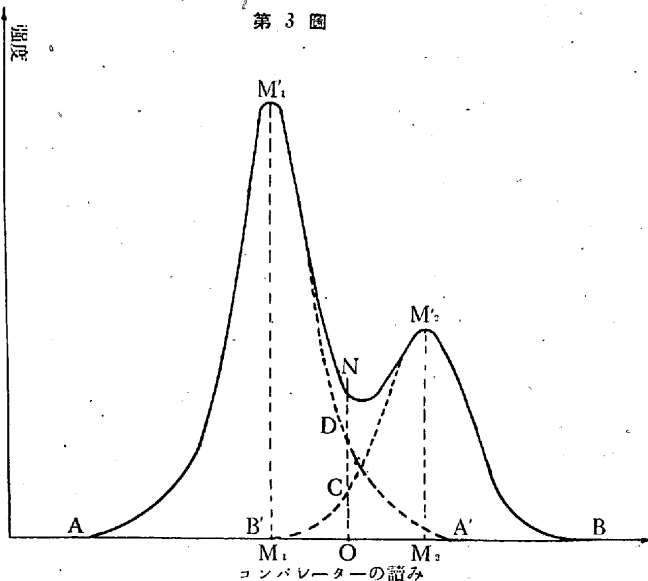
29.12.6=6.75

第2圖



24.9.27=6.53

第3圖



けられる。これより直ちに半價幅  $S$  (6.(21)式参照) 及プラメーターに依て  $A$  (6.(20)式参照) を測定し  $A/I_0$  を求める。この場合  $S$  及  $A/I_0$  の測定値は1枚のフィルムより4個づゝ得られるので、此の平均を求める。

又  $M_1M_2$  は(1)式より計算に依て  $0.01431$  ラジアンであるので  $S$  及  $A/I_0$  は直ちにラジアン單位に換算出來(21)及(20)式より、平均第二種残留歪  $\phi$  が求められる。

第一種の残留歪は、焼鈍試料の線間距離を  $l_0$  加工試料の線間距離を  $l$  とし、 $\Delta l = l_0 - l$  を  $\Delta\theta$  (ラジアン) に換算して、2.(2)式に依り求められる。

8. 實驗結果

(1) 冷間引拔炭素鋼棒中心部の軸方向の第一種の残留歪

第2表 25炭素鋼棒

引拔加工率 (%)	線間距離 $l(mm)$	$\Delta\theta \times 10^2$ (ラジアン)	$\epsilon(\%)$ *
0	$52.80 = l_0$	0	0
5	52.05	0.233	-0.037
10	49.75	0.949	-0.150
15	49.60	0.995	-0.158
20	49.55	1.01	-0.160
25	49.51	1.02	-0.162
30	—	—	—

第3表 35炭素鋼棒

引拔加工率 (%)	線間距離 $l(mm)$	$\Delta\theta \times 10^2$ (ラジアン)	$\epsilon(\%)$
0	$51.65 = l_0$	0	0
5	49.80	0.575	-0.091
10	49.45	0.684	-0.108
15	48.25	1.057	-0.167
20	47.75	1.21	-0.192
25	47.85	1.18	-0.187
30	48.15	1.09	-0.172

第4表 45炭素鋼棒

引拔加工率 (%)	線間距離 $l(mm)$	$\Delta\theta \times 10^2$ (ラジアン)	$\epsilon(\%)$
0	$52.15 = l_0$	0	0
5	50.15	0.622	-0.099
10	48.75	1.057	-0.167
15	48.45	1.151	-0.182
20	49.05	0.964	-0.153
25	48.55	1.119	-0.177
30	48.10	1.104	-0.175

第5表 55炭素鋼棒

引拔加工率 (%)	線間距離 $l(mm)$	$\Delta\theta \times 10^2$ (ラジアン)	$\epsilon(\%)$
0	$51.60 = l_0$	0	0
5	49.35	0.699	-0.111
10	48.55	0.949	-0.150
15	—	—	—
20	47.60	1.244	-0.194
25	47.55	1.259	-0.199
30	48.05	1.104	-0.175

(2) 冷間引拔炭素鋼棒中心部の平均第二種残留歪

第6表 25炭素鋼棒

引拔加工率 (%)	$S \times 10^2$ (ラジアン)	$A/I_0 \times 10^2$ (ラジアン)	$\Phi_1(\%)$ *	$\Phi_2(\%)$ **
0	$0.861 = S_a$	$0.986 = (A/I_0)_a$	0	0
5	1.558	1.738	0.037	0.038
10	1.928	2.006	0.057	0.051
15	1.773	1.906	0.049	0.046
20	1.648	1.776	0.042	0.040
25	2.128	2.180	0.068	0.060
30	2.270	2.395	0.076	0.071

第7表 35炭素鋼棒

引拔加工率 (%)	$S \times 10^2$ (ラジアン)	$A/I_0 \times 10^2$ (ラジアン)	$\Phi_1(\%)$	$\Phi_2(\%)$
0	$0.808 = S_a$	$0.970 = (A/I_0)_a$	0	0
5	1.586	1.735	0.042	0.039
10	1.774	1.841	0.052	0.044
15	2.425	2.510	0.087	0.078
20	2.618	2.690	0.097	0.087
25	2.497	2.594	0.091	0.082
30	2.596	2.644	0.096	0.084

\* \*\* 6(20)及(21)式に於て  $\cot\theta = \cot 81^\circ = 0.1584$  であるから  
 $\phi_2(\%) = 100\phi = 5.04 \{ (A/I_0) - (A/I_0)_a \}$   
 $\phi_1(\%) = 100\phi = 5.36(S - S_a)$   
 を計算式として使用する。

\* 正は引張残留歪、負は壓縮残留歪を表はす。

第8表 45炭素鋼棒

引抜加工率(%)	$S \times 10^2$ (ラヂアン)	$A/I_0 \times 10^2$ (ラヂアン)	$\Phi_1(\%)$	$\Phi_2(\%)$
0	0.778 = $S_a$	0.933 = $(A/I_0)_a$	0	0
5	2.155	2.220	0.074	0.065
10	2.497	2.584	0.092	0.083
15	2.727	2.699	0.105	0.089
20	2.202	2.301	0.076	0.069
25	2.948	2.982	0.116	0.103
30	2.572	2.684	0.096	0.088

第9表 55炭素鋼棒

引抜加工率(%)	$S \times 10^2$ (ラヂアン)	$A/I_0 \times 10^2$ (ラヂアン)	$\Phi_1(\%)$	$\Phi_2(\%)$
0	0.700 = $S_a$	0.824 = $(A/I_0)_a$	0	0
5	1.903	2.062	0.064	0.062
10	2.180	2.326	0.079	0.076
15	3.188	3.178	0.133	0.119
20	2.899	2.995	0.118	0.109
25	3.113	3.169	0.129	0.118
30	3.424	3.654	0.152	0.143

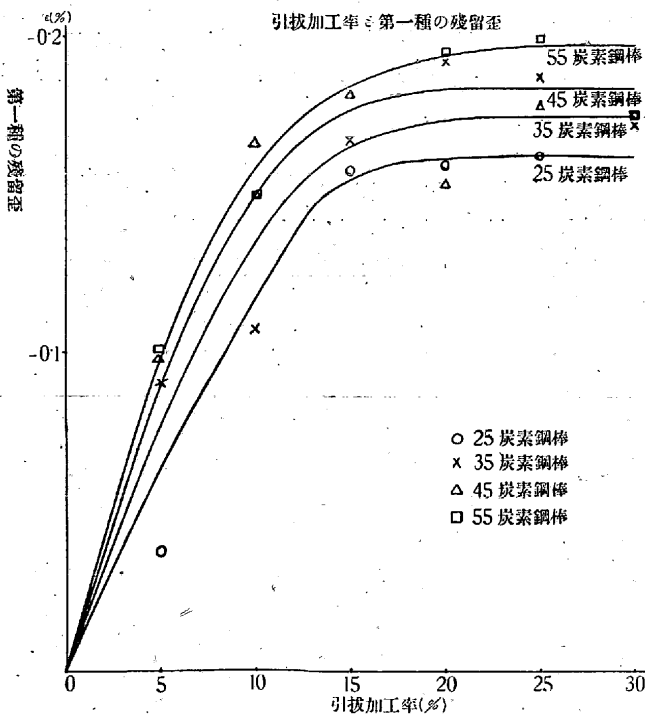
9. 実験結果の考察

I. 前掲の各表を總括すると、第4圖及第5圖の如くなる。

第4圖及第5圖より次の結論が得られる。

- 1) 引抜炭素鋼棒の中心部は、引抜方向に第一種の壓縮残留歪を有して居て、
  - a) 加工率 0~15% に於て著しく増加し、20% 附近に於て飽和に達し -0.15~-0.2% 程度の値を示す。
  - b) 炭素含有量の異なる程、同一の加工率に於ける第一種の残留歪は大である。

$2.9 \times 2.6 = 7.54$   
第4圖



i) 平均第二種残留歪は

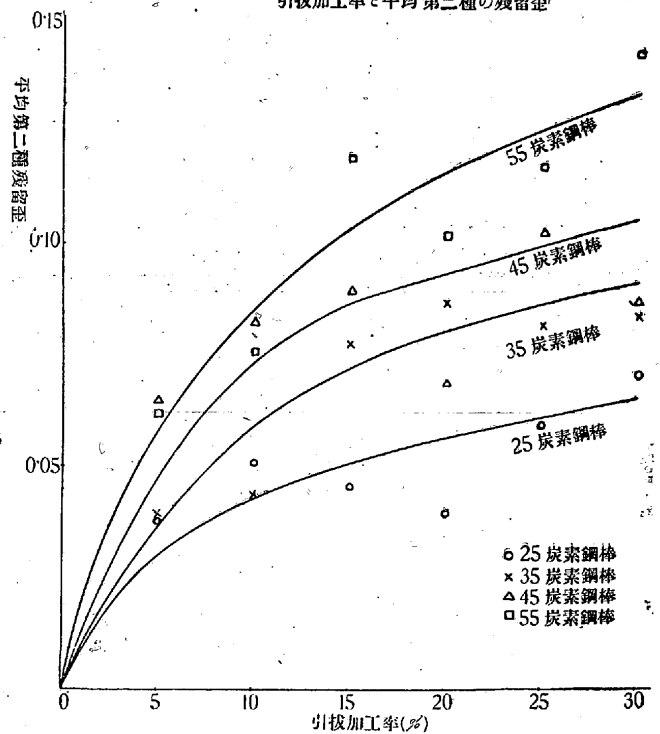
- a) 加工率 0~5% に於て急増し、爾後緩慢なる増加を30% に到る迄続け、飽和現象は認められない。
- b) 炭素含有量の異なる程、同一の加工率に於ける平均第二種残留歪は大であつて、加工率 30% に於ては、0.07~0.14% である。

引抜加工を受けつゝある状態を考察すると、棒の外周部は引抜方向に牽引され、中心部は引抜方向と逆方向に押戻されて塑性變形を起し、著しく壓縮される。従て外周部には引抜方向に第一種の引張残留歪が生じ、中心部には第一種の壓縮残留歪が生ずる。然るに X 線は棒の中心部に於て、横断面に殆んど垂直に反射せしめたものであるから、X 線分析の結果は、當然第一種の残留歪として、壓縮歪が得られる筈であつて、實驗結果はこれを裏書して居る。

次に第一種の残留歪が加工率 20% 附近で飽和に達して居るといふ事は、換言せば加工率が增加して行ても、第一種の残留歪は、或る一定値以上には増加し難いと云ふ事である。加工中に於ては、歪が弾性限を超過した部分から漸次塑性變形を起す。\* 此の場合塑性變形は歪エネルギー

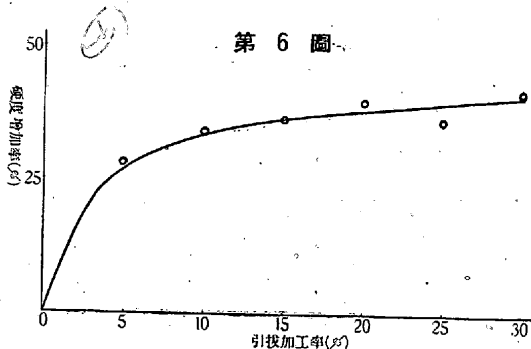
\* 加工中に於て、局部的に水壓的壓縮力が掛る様な特殊な場合がある。この場合には歪が弾性限を越へても塑性變形は起らないのであるが、かかる水壓的壓縮歪は極めて不安定な状態にあるので、引抜加工の如く、材料の各部分が常に移動して居る様な場合には、存在する可能性極めて尠いと思はれる。

第5圖 33 x 29 = 8.91  
引抜加工率と平均第二種の残留歪



の減少する方向に起る。依て塑性變形を行て居る部分の歪は次第に低下し、歪が弾性限内に戻ると同時に、其の部分の塑性變形は終了する。即ち塑性變形を行た金属材料中には、弾性限以上の残留歪は存在し難い事になる。此所に弾性限なる言葉を、餘り吟味せずを使用したのであるが、弾性限なるものを、多結晶體、殊に加工を施した金属材料に於て使用するのは、不適當とされて居るので、弾性限の代わりに、残留歪が超過し難い或る限界値が存在すると考へる事にする。斯る限界値の存在を假定すると、第4圖に現はれて居る、残留歪の飽和現象が説明出来る。又炭素鋼の弾性限が、炭素含有量と共に上昇する事より、残留歪の限界値も、炭素含有量と共に上昇すると考へられ、第4圖にこの傾向が見られる。然し本實驗に於ては、加工率 30% 以上の部分は測定して居ないので、上述の考察を斷言する事は保留する。

引拔炭素鋼棒の硬度増加率を測定すると、大略第6圖の如き結果を得る。第6圖は一例として 35 炭素鋼棒（ヴァイツカース硬度約 180）に就ての結果である。この結果を見るに、硬度の増加は、加工率 0~5% に於て著しく、爾後



緩慢なる増加を 30% に到る迄續け、飽和現象は認められない。即ち冷間引拔加工に依る硬度の増加と、第二種の残留歪の上昇様式と似て居る。この事は4で述べた、第二種の残留歪と機械的性質の關係の考察よりも豫想される事である。

ある。

即ち以上の如き考察を加へることに依り、加工に依る機械的性質の變化が、残留歪の測定より推察し得ると考へられる。尙本實驗結果の詳細なる考察は、引續き行ふ引拔炭素鋼棒の機械的性質の實驗結果に俟て發表する。

II. 平均第二種残留歪の測定式 6. (20) 及 (21) 式より  $\phi_1, \phi_2$  (8. 第 6, 7, 8 及 9 表参照) を求めると、相當よく一致する。この事は、(15) 式、從て (6) 式の假定が不適當でなかつた事を示すものである。又 (20) 式と (21) 式の孰れが測定式として適當であるかと云ふに、強度曲線が明瞭に求められ、半價幅  $S$  が正確に測定出来る時は (21) 式の方が便利である。然し半價幅を測定する附近に於て、強度曲線が不明瞭の時には、全積算強度  $A$  を求める方が確實であつて、(20) 式を使用する方が都合のよい事がある。更に  $A$  を求めると 3. (i) に於て述べた第二種の残留歪の機構説に對する検討も同時に行へるので、此の點に於ても (20) 式を使用する方が便利である。然し本實驗に於ては、入射 X 線量を一定に保つ事が困難であつた爲め、全積算強度  $A$  と、平均第二種残留歪の關係を究明する事は出来なかつた。

## 10. 結 言

以上の如く、引拔加工に依る残留歪を中心として、残留歪と機械的性質の關係に、若干の考察を加へて見たのであるが、機械的性質の測定が未だ完了して居ないので、詳細な考察は後報に譲る事にする。X 線的研究も更に續行して行ひ、冷間加工に對する考察を残留歪の方面より攻究すべく實驗繼續中である。

最後に本研究に對して、直接指導を賜た。當所囑託大阪帝國大學教授篠田軍治氏に厚く謝意を表す。