

ピアノ線の X 線による研究

(日本鐵鋼協會第 28 回講演大會講演 昭和 17, 10. 於東京)

永田三郎*

AN X-RAY STUDY OF PIANO WIRES

Saburō Nagata

SYNOPSIS:—The relation between the crystalline structure and the degree of cold working was investigated with the imported piano wires of excellent quality and those furnished by a Japanese factory. The size, the degree of fibrous arrangement and the internal strain of grains in the specimens plastically deformed in various grades were measured by means of X-rays. Then the density of specimens which had been cold worked differently was measured precisely and their heat treatment was examined. From the result of the measurement, a comparison between the excellent imported wires and those furnished by Japanese factory was made.

I. 緒言

金属材料の機械的性質と加工度との関係は既によく調べられてゐるが、加工硬化の機構は未だ確立されてゐない。よつてピアノ線の X 線試験を行ひ、その内部の微細構造と加工度との関係を研究し、國産及外國製ピアノ線の物理的性質の相違を調べ、國産品の性能向上の資料を得、亦材料の非破壊試験法を確立せんとするものである。未だ實驗途中にして今後の研究に俟つものであるが今迄に得た結果を述べる。

吉田教授 (Yoshida, U.: Memoirs of Col. of Sci. Kyoto Univ. A. XXIII. 1941. 351.) によれば可塑性變形に際して金属の機械的性質に影響を及ぼす原因は次の如く考へられる。

- (1) 元の結晶から分散した方位を持つ小さな結晶への結晶の微細化。
- (2) 微結晶中の格子の亂れ。
- (3) 微結晶内の不揃な内部歪の形成。
- (4) 微結晶粒境界に於ける結合性非晶層の生成。
- (5) 微結晶間に於て結合力の弱い局部の形成。

此等の原因の中 (3) 及 (5) は金属の降伏點、或は弾性限を低下するが、(2) は微結晶内の迂り面に沿ふて上ることを妨げ、(4) は (1) と共に微細化された結晶間の迂りを困難にすることにより金属を硬化する。可塑性變形に際して生ずる此等 5 つの變化は獨立に起るものではなく、その間に密接な關係があるが、個々の影響は場合により異り、ある時には最も大きな作用をなす原因も他の場合には比較的影響が少ないこともある。これらの原因を追求するのに X 線

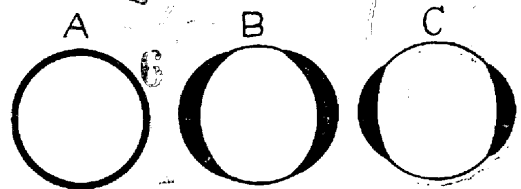
は 1 つの有力なる手段と考へられる。

試料は外國製品としてはギャルピダン、國産品としては某社製のものを使用した。共に 0.9% C の炭素鋼である。

II. 實 驗

1. 纖維度の測定

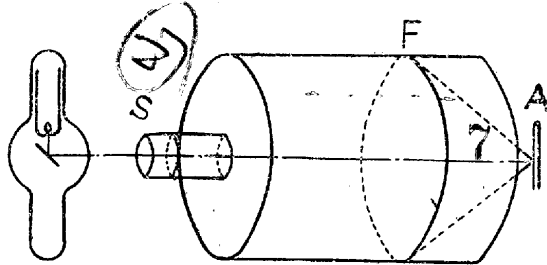
金属材料を線引すると引張の方向に一定の結晶軸が配列し所謂纖維構造を有する様になることはよく知られてゐる。而して加工度が増加するにつれて益々その配列度を増大する。之は加工度の増加に伴ふ抗張力の増大と伸びの減少とに密接なる關係がある。纖維度の決定には普通光學的方法、X 線的方法等が考へられるが、金属の場合には X 線を用ひるのが最もよい方法と思はれる。然るに纖維構造の程度を示す纖維度について一定の定義が存在しない。後藤、田中兩氏 (東大航研報 174. 93) は鋼線の X 線寫眞をとりその赤道線上の (220) 面と (113) 面或は (222) 面の反射による強度をフォトメーターにて測りその強度の比 $1(220)/1(113)$ 或は $1(220)/1(222)$ を以て纖維度を表はされてゐる。この方法は比較的簡單であり且この數値は纖維度の増加と共に増大するのであるが、その數値に物理的意味がなく且結晶形により亦使用した反射面により變化し一般性を有しない。よつて私は次の如きものにより纖維度を表はすことにした。この方法は有機物纖維界に於ては一部使用せ



第 1 圖

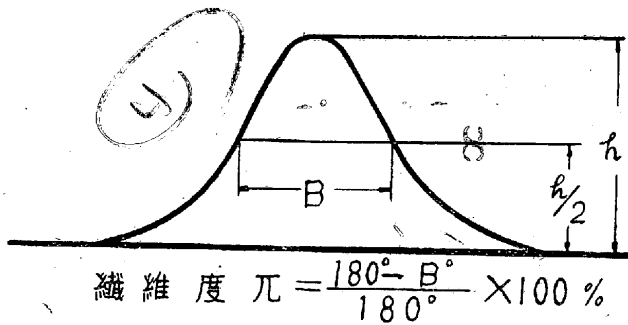
* 大阪陸軍造兵廠

られてゐるものである(吳, 久保; 工業化学雑誌 39. 929). 方向性を有しない粉末ではデバイ・シェラー環は強度一様な圓であるが(第1圖A)纖維度を増すと共に(B)の如く圓弧となり, 遂には一點に收斂する(C). 今第2圖に於



第 2 圖

て細隙Sを通過し, 試料Aにあつて廻折せるX線を細隙と共通の圓筒軸を有する圓筒形取枠中に入れたるフィルムFにて受けるときは, 撮影後フィルムを開くとデバイ・シェラー環が直線となる故, 現像後之に沿ふてフォト・メ

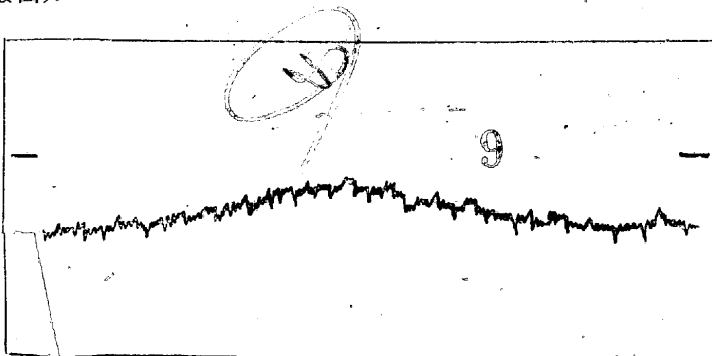


第 3 圖

ーターをかけて強度曲線を畫かしめその強度が半分となる所の幅をB(度)とすると(第3圖参照).

$$\text{纖維度} : \pi = \frac{180 - B}{180} \times 100\%$$

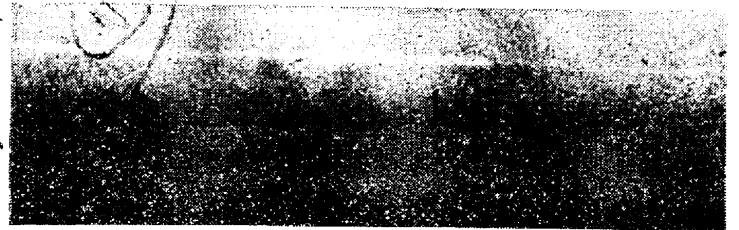
を以て纖維度を表はす. 即ち粉末の如き全然方向も持たない時は $B=180^\circ$ なる故纖維度は 0% 理想的な單純纖維組織を有するときは $B=0^\circ$ となる故 $\pi=100\%$ である. この際使用する結晶面につき次の注意が必要である. (イ)なるべく赤道線上に強い反射點を有すること(纖維軸に平行な面).



第 4 圖

(ロ)他の結晶面による反射のため妨げられないこと. 特に立方晶形の場合にはこの注意を要する.

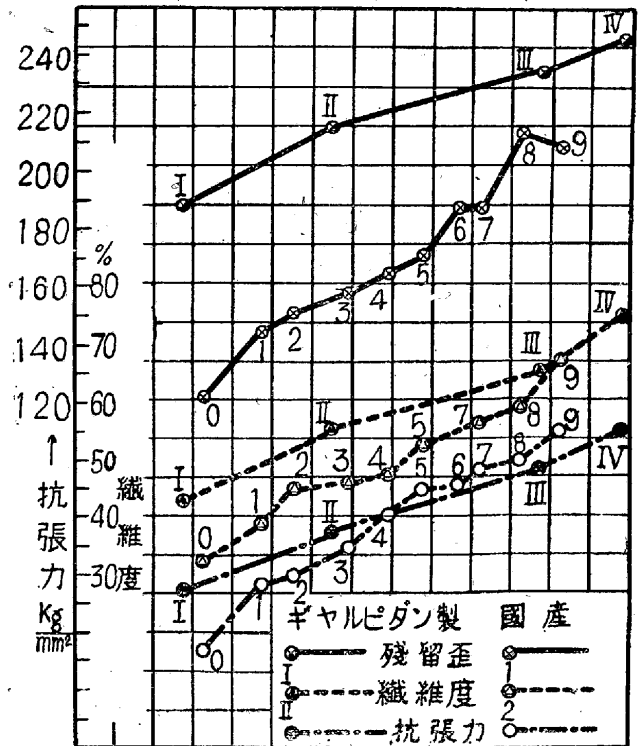
鐵は體心立方晶形にして牽引せる針金は(110)方向を纖維軸とする. よつてコバルト $K\alpha$ 線を用ひ(220)面を使



第 5 圖

用した. 之は上の條件を満足するからである. 尚試料表面は酸化物等の附着, 加工の際の影響等を除くため 20% 硝酸にて表面を腐蝕し約 0.15mm 除去した後X線撮影を行つた(以下實驗 II, III 等に於ても同じ).

■國產資料につき焼鈍せるもの, 調質せるもの(第0)及
44 x 25 = 1100



燒鈍	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
國線徑	2.94	2.277	2.015	1.777	1.617	1.583	1.504	1.409	1.393	1.295
産加工度	0	294	404	628	633	804	780	882	886	650
ギヤルピダン	I	II		III		IV				
燒鈍	I	II		III		IV				
線徑	2.958	2.020		1.010		75.7				
産加工度	427	556		650		75.7				

第 6 圖

第 7 圖

各種の加工度に加工せるもの(第1~9)及ギヤルピダン製品(第1~4)につき上記の如くして纖維度を決定した。そのX線寫眞及フォト・メーター曲線の1例は第4圖及第5圖にして、その結果を第1表及第6圖(點線)に示す。圖に於てギヤルピダンのものは製品として入手したもので、その加工度は不明であるが今假に線徑を横座標にとつて比較したものである。加工度と共に略直線的に纖維度を増大するが、ギヤルピダンの方が約5~10%纖維度が良好である。尙調質せるままのものも約30%程度の纖維度を有し、最初に線引した時の影響が熱處理により完全に除去されず残留してゐる。

2. 残留歪の測定

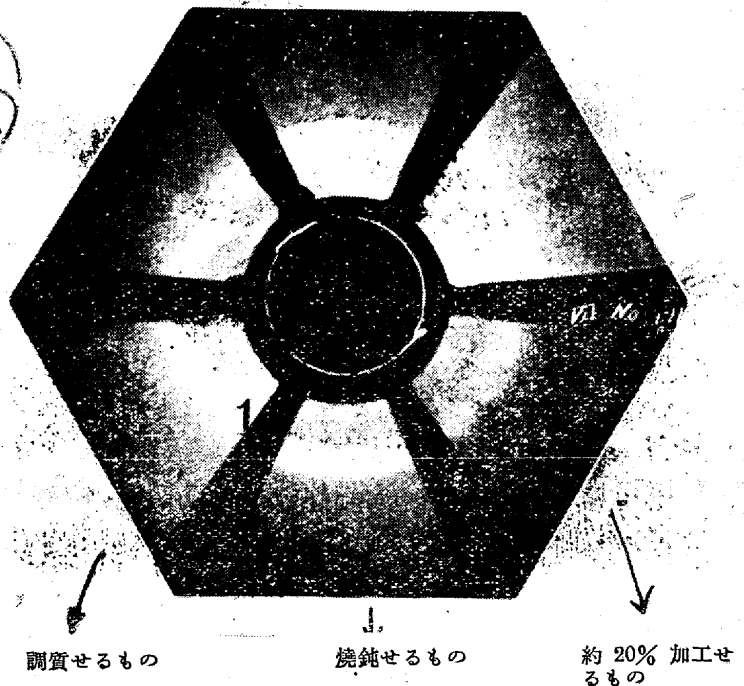
加工を受けた材料に於ける弾成歪力は一樣に分布せられ、巨視的な範圍に於ては一樣な彈性

第 1 表

國 産 品	第 線 徑	加工度	半 價 幅	纖 維 度	
	燒 鈍	-	180°	0	
0	2.94	0	123.1°	31.6	
1	2.479	29.4	110.8°	38.4	
2	2.277	40.4	101.6°	43.5	
3	2.015	62.8	100.0°	44.4	
4	1.777	63.3	96.9°	46.2	
5	1.617	69.7	86.2°	52.1	
6	1.383	78.0	-	-	
7	1.301	80.4	80.0°	55.6	
8	1.069	88.2	75.4°	58.1	
9	0.993	88.6	61.5°	65.9	
ギダ ヤン ル ビ	I	2.958	不 明	103.0°	42.7
	II	2.020	//	80.3°	55.6
	III	1.010	//	63.1°	65.0
	IV	0.495	//	41.6°	75.7

變形が残留するものと考へられる。この歪力は格子の中で標準の原子の位置をX線の波長に對し大なる範圍内で變位せしめ、從つて干涉X線の方向を變化させる。X線干涉線の移動の大きさは弾性的の伸びに比例するから、この移動を測定することにより材料内部に残留する歪力の大きさを測定することが出来る。この方法はクロツカー等により始められたもので第1種の固有歪力と稱せられてゐる。異つた2或は3方向よりX線を試料に投射し、歪力の大きさのみならず主要歪力の方角をも知ることが出来るが、本實驗に於ては試料に直角の方向よりX線を投射し平均の歪力を測定した。

今面間距離を d 、歪のない時の d を d_0 とすれば、伸 ϵ は



$$\epsilon = \frac{d-d_0}{d_0} \dots \dots \dots (1)$$

試料のヤング率を L 、ポアソン比を V 、彈性歪力を σ で表はすと、彈性理論より

$$L\epsilon = -V\sigma \dots \dots \dots (2)$$

面の法線と投射X線との間の角を φ とすれば、その方向の伸 ϵ_φ は

$$\epsilon_\varphi = \epsilon[1 - \{(1/V) - 1\} \sin^2 \varphi] \dots \dots \dots (3)$$

となる(1)(2)(3)式を用ひ、格子常數の變化をX線寫眞より測定し、残留歪の大きさを計算することが出来る。反射角が90°に近い程、格子常數測定の精度が良いから、對陰極はコバルトを用ひ、鐵の(310)面を使用した。この場合 $0(310) = 80.5^\circ$ である。實驗1と同じ試料につき背面反射法によりX線寫眞を撮影した。その一例を第7圖に示す。

尙試料と寫眞フィルムとの距離 R は燒鈍せる金の薄板を同じ位置でX線寫眞をとることにより決定した。斯くして得た寫眞を直徑の方向にフォトメーターをかけ、線間距離を測定し、残留歪を計算した。その結果を第2表に示す。

この際鐵のヤング率 $L = 21000 \text{ kg/mm}^2$ 、ポアソン比 $V = 0.28$ と採つた。標準の格子常數 a_0 としては同一試料を900°Cにて1h真空燒鈍を行つたものより決定した。以上の結果を圖示すると、第6圖(---にて示す)の如く本實驗の範圍内ではどちらも加工度と共に略直線的に残留歪を増大する。尙鐵の $K\alpha$ 線で(220)面の反射を利用するとスペクトル線はコバルトのときより明瞭に出るので之に

第 2 表

第	線間距離 mm	sin θ	α ₀ Å	Δα Å	ε = $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \times 100$ %	σ kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²
國産品 R=51.8mm	焼鈍	21.0 ⁽²⁾	0.9858 ₉	2 8632	0.	0.	
	0	20.4 ₈	0.9866 ₀	2 8643	0.0011	0.038	32.5
	1	20.6 ₈	0.9863 ₉	2 8651	0.0019	0.066	56.4
	2	20.6 ₈	0.9862 ₉	2 8652	0.0020	0.070	59.9
	3	20.7 ₈	0.9861 ₉	2 8655	0.0023	0.080	68.4
	4	20.8 ₈	0.9860 ₉	2 8651	0.0027	0.094	80.4
	5	20.9 ₈	0.9859 ₉	2 8661	0.0029	0.101	86.4
	6	20.9 ₈	0.9859 ₉	2 8662	0.0030	0.105	89.8
	7	21.0	0.9858 ₉	2 8664	0.0032	0.112	85.8
	8	21.0	0.9858 ₉	2 8665	0.0033	0.115	98.3
9	21.1 ₈	0.9857 ₂	2 8668	0.0036	0.126	107.7	
ギヤルピダン R=59.6mm	焼鈍	20.9 ⁽²⁾	0.9856 ₉	2 8638	0.	0.	
	1	20.6 ₈	0.9861 ₂	2 8656	0.0018	0.063	53.8
	2	20.8 ₈	0.9858 ₉	2 8663	0.0025	0.087	74.4
	3	21.0	0.9856 ₉	2 8670	0.0032	0.112	95.8
	4	21.1	0.9855 ₄	2 8674	0.0036	0.126	107.7

4 抗張力は虎岩頼夫氏の測定されたものである。

ついても実験を行つた所、概ねコバルト Kα 線を用ひたときと一致した結果が得られたので此處では省略するが、精度に於ては 0 が 90° に近いコバルトの方が良い様に思はれる。残留歪の大きさは兩者大差ない様であるが、今抗張力を同じ目盛で圖上(第 6 圖實線にて示す)にとつてみると、残留歪と抗張力とは同一試料については夫々略平行し、この間に密接なる関係がある様に思はれる。そして抗張力と残留歪との差をとつて見ると國産品(この試料は稍古く最近の製品では抗張力をもつと上昇してゐる)は略 90kg/mm² ギヤルピダンの方は 140 kg/mm² となりその間に相當大きな差が存在する。

3. 結晶粒子の大きさ及硬度の測定

結晶粒子の大きさが顕微鏡以下の大きさにあるときは微細となるにつれて X 線スペクトルの幅に散散を生ずる故、之によつてその大きさを測定することが出来る(10⁻⁴~10⁻⁷cm)。尙この散散は結晶の大きさのみならず格子面の彎曲、不揃な格子歪(第 2 種の固有歪力)によつても影響を受けるのであるが、今結晶粒子の大きさのみによるものと考へてその大きさを推定して見た。尙これに要するフォト・メーター曲線は實驗 II に用ひたものを利用したが、精密に行ふためには更に倍率を大にする必要があるが、これでも概略の値を推定出来る故、参考の爲、これから計算したものである。

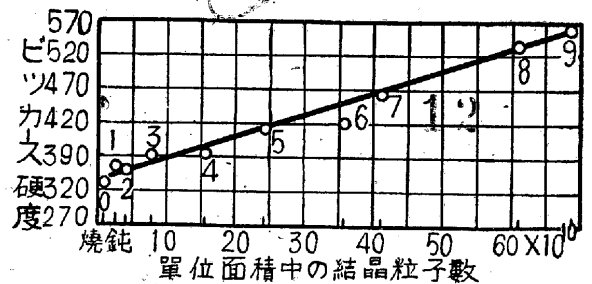
スペクトルの幅 B より結晶粒子の一辺の長さ t を求めるにはラウエの式を用ひ、鐵は立方晶形であるから簡単に

$$B = \frac{0.9\lambda}{t \cos\theta} + b$$

となる。此處に入は入射線の波長、θ は入射角にして b は細隙の大きさ及位置、試料の形及大きさ、カメラ半径等の條件により決定される常數である。結晶粒子がある大きさ以上になると B は一定の幅を持つ様になる。先づ顕微鏡及 X 線寫眞より焼鈍試料の結晶粒子の大きさは 4 × 10⁻⁴ cm と推定し、これより t を求めると B = 0.364 (ラジアン) となる。これより各加工度の粒子の大きさを計算せる結果は第 3 表及第 8 圖の如く(不揃な内部歪等による幅の擴大が存在すれば實際の結晶粒子の大きさは稍この値より大とな

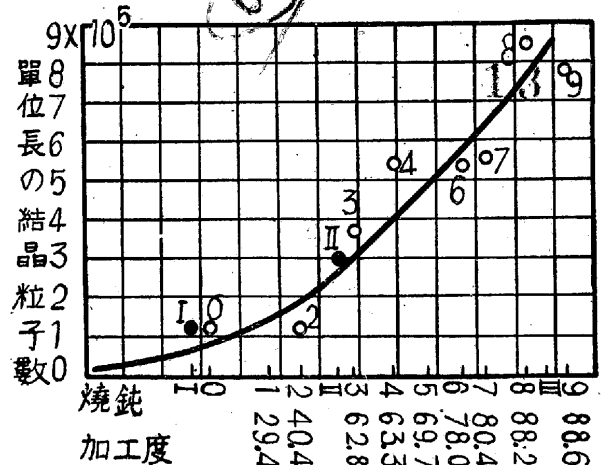
第 3 表

第	半價幅 B ラジアン	粒子の大きさ t Å	單位長粒子數 1/t × 10 ⁶	ビツカーズ硬度	
國産品 焼鈍	0	4 0000	0.025	370	
	0	0.0440	772	1.23	333
	2	0.0435	827	1.21	351
	3	0.0580	273	3.68	373
	4	0.0679	186	5.37	376
	6	0.0678	187	5.35	421
	7	0.0690	180	5.55	464
	8	0.0859	119	8.43	542
	9	0.0823	128	7.82	560
	ギヤルピダン 焼鈍	0	4 0000	0.025	—
1		0.0420	898	1.19	478
2		0.0587	547	2.88	460
3		—	—	—	560



第 8 圖 結晶粒子數と硬度

るであらう)結晶粒子數は加工度と共に大となり、その増加の割合は初は比較的緩で、40%附近より急となる様である。兩製品の粒子の大きさには大差ない様に思はれる(ギヤ



第 9 圖 結晶粒子數と加工度

ルピダン第3及第4は強度曲線の傾斜甚だ緩にして測定困難のため省略した) 尙單位面積中の結晶粒子數とビツカース硬度とを兩軸として圖示すると第9圖の如くこの間には略直線的的關係が認められる。

4. 比重の測定

結晶の單位胞の體積を V としその中に含まれてゐる原子數を n , その一原子の質量(原子量に 1.649×10^{-24} g を乗じたもの)を M とすればその結晶の比重 S_λ は

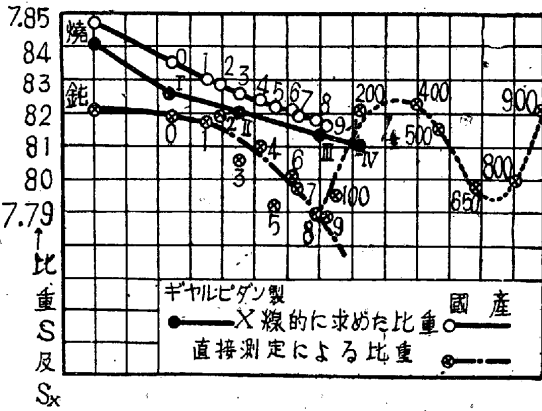
$$S_\lambda = nM/V$$

鐵は體心立方晶であるから $n=2$

$$M = 1.649 \times 10^{-24} \times 55.84$$

且 $V = a_0^3$

である。今實驗 II より得たる格子常數を用ひて比重を求めると、第4表の S_x 欄の如くなる。X線により求めた格子常數 a_0 は鐵の結晶部分のみを考へてゐるから、不純物、氣泡、破隙等が存在すれば、比重に變化を生じてくる。よつて化學天秤を用ひて直接比重を測定し、上の結果と比較した(後者は數回の測定の平均値である)。之を圖示すると第10圖の如くなる。尙ギヤルピダンの方は試料が甚だ少



第 10 圖

量しかなかつた爲、直接天秤で測定した値は相當誤差が大きいのので省略した。焼鈍せる試料の比重に於て直接測定せる値はX線測定値より約 0.2% 小である。これは結晶境界に於ける不純物の影響及微小なる空隙によるものと想像される。そしてX線的測定値は加工と共に直線的に減少するに對し直接測定値の比重の減少は最初比較的緩で加工度約 60% 附近より急となる。この原因を考へるに最初は加工により初に存在した氣泡等による空隙を減少せしめるが、加工が或る程度以上に達すると微細な破隙を生じ、比重を著しく減少せしめる。従つて兩測定値の差は最初稍大にして、次第に減少し約 50% 附近で最小となり、再び次第に増加するのである。この事實は井形氏, A. Igata Memoirs

of Col. of Sci Kyoto Imp. Univ. A. XIX. 1936. 215. XX. 1937. 35. XXIII. 1941. 189.)が純銀につき測定されたる加工による比重の變化の事實とよく一致する。この微細なる破隙の生成は最初に述べた結晶間の弱結合力の局部にして、材料の強度を弱める原因となるものである。

次に加工度約 88% の試料(第 8)を各種の溫度で 1 h 焼鈍すると、初め比重は増大して 200~400°C で極大となつて減少し、700°C 附近で極少となり、再び増大する(第 5 表及第 10 圖參照)この最初の増大は内部歪の除去に原因するものであり續いておこる比重の減少は内部に含まれてゐるガスの膨脹による空隙の増大又は生成に起因するものと考へられる(之と同じ現象を井形氏は純銀について得られてゐる)。そして比重の極大の位置は熱處理による抗張力の極大値(200°C)の位置より稍高溫側にづれてゐる様で

第 4 表

第	S_x	S
燒鈍	7.846	7.821
0	7.837	7.819
1	7.830	7.818
2	7.829	7.819
3	7.827	7.806
4	7.824	7.809
5	7.822	7.791
6	7.821	7.801
7	7.820	7.797
8	7.819	7.788
9	7.816	7.787
燒鈍	7.841	—
ギヤルピダン	1 7.826	—
2	7.820	—
3	7.815	—
4	7.811	—

第 5 表

熱處理溫度 °C	S
其の儘	7.793
100	7.795
200	7.821
400	7.823
500	7.816
650	7.98
800	7.800
900	7.820

あるが彈性限の極大値(300°C 附近)と一致してゐる。この間の關係については更に研究を進めたいと思ふ。

III. 結果の考察

以上の結果を考察するに残留歪は兩者殆んど大差なく、加工度にも大なる差がないものと想像される。纖維度はギヤルピダンの方が稍良好である。然るに抗張力に於ては兩者相當著しい相違があるのは何に基因するものであらうか。上記の5つの原因について考へるに(1)結晶粒子の大きさ、(2)微結晶中の格子の亂れ及(3)微結晶内の不揃な内部歪については兩者大差がない様に思はれ、その影響とは認められぬ。(4)微結晶粒境界に於ける非晶層については現在の所わからないからこの問題には觸れず。(5)微結晶間の結合力の弱い局部の形成が重大なる原因であらうと推定される。實驗 IV から結晶間弱結合力の局部の形成は想像される。兩者の残留歪等が略同様であるが纖維度についてギヤルピダンの方が若干優つてゐる原因は線引の技術に

よるのでないかと思はれるので弱結合力の局部の生成を防止する様線引の条件を變へて実験を進めたいと思つてゐる。

第6圖に於て面白いことは兩製品の加工度と抗張力、残留歪及纖維度の關係を示す3直線が兩者の傾斜は違ふが同一製品に就ては之等の3直線が殆ど平行し此等の間には密接な關係が存在することが認められるのである。このことについては更に研究を進めたいと思つてゐる。尙同一試料の内部と外部に於ける纖維度、残留歪の分布を測定してゐるが之は次の機會に述べたいと思ふ。

IV. 結 論

- 1) 纖維度測定の方法を定義す。
- 2) 纖維度は加工度と共に略直線的に増大す。

3) 残留歪は本實驗の範圍内では加工度と共に略直線的に増大す。

4) 結晶粒子の微細化は加工度につれて初め緩に約50%附近より急となる。

5) 加工度と纖維度、残留歪及抗張力との關係圖を畫けば同一製品にてはこの三直線が殆んば平行し之等の間に密接なる關係がある様に思はれる。

6) X線的及直接天秤により比重を測定し加工度及熱處理と比重の變化との間の關係を研究す。

7) 以上の實驗より國産品及ギャルピダン製品の性能相違の原因を考察す。

終りに本研究に對し御懇篤なる御指導を賜つた吉田教授に對し厚く謝意を表する次第である。

昭和製鋼所製壓延鋼材の機械的性質に及ぼす化学成分の影響

(日本鐵鋼協會第27回講演大會講演, 昭. 17. 4. 東京)

藤田守太郎*・坂井幸雄*

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SHOWA ROLLED STEEL

Moritārō Huzita and Yukio Sakai

ABSTRACT:—An approximate solution for a formula giving tensile strength in terms of chemical composition was presented, and empirical formulae for Showa rolled steel were introduced in the solution. These were compared with other formulae given by previous authors. Then the characteristic properties of Showa rolled steel were discussed.

目 次

- I. 緒 言
- II. 試料及試験方法
- III. 鋼の抗張力算出に關する實驗式の近似的一解法
- IV. 實驗式の誘導及其吟味
- V. 抗張力に及ぼす各成分の影響
- VI. 昭和製壓延鋼材の特性
- VII. 結 言

I. 緒 言

鋼の機械的性質に及ぼす化学成分の影響に關する研究調査の歴史は相當古く、1880年頃には既に幾多の論文が發

表され、其の後益々盛になり今日に及んで居る。

即ち各成分の影響に就ては W. R. Webster, H. H. Campbell, J. E. Stead, J. O. Arnold, P. Oberhoffer の諸氏其他多數の研究發表があり、H. H. Campbell, M. Merriman, A. McWilliam, 城. 足立の諸氏は抗張力を化學成分にて算出する實驗式を發表して居る。尙マンガンの影響に就ては D. M. Levy, G. Lang, A. Stadeler, Neville and Cain, L. Gillet, 濱住の諸氏の報告があり、珪素の影響に就ては T. Turner, R. Hadfield, L. Gillet, P. Paglianti の諸氏、磷の影響に就ては R. Akerman, P. von Turner, E. D'Amico, 嘉村の諸氏、硫黄の影響に關しては J. O. Arnold and G. B. Waterhouse, A. Wahlberg, J. S. Unger, T. E. Hurst

* 昭和製鋼所研究所