

常温加工金属の残留内力並に結晶粒の 焼鈍による変化に関する研究

(第3回工学会大会講演)

上 田 太 郎*

ON THE CHANGE OF INTERNAL STRESS AND CRYSTAL GRAINS
IN THE COLD TWISTED METALS DUE TO ANNEALING.

Tarō Ueda

SYNOPSIS:—Since the internal stress was found to be distributed in the interior of specimen which was given twisted deformation, the releasing condition of the stress due to annealing at various temperatures was studied. It was found that a large portion of the stress disappeared in the range of temperatures 300~500° in the case of iron and carbon steel, 100~400°C in the case of copper, and 50~200°C in the case of magnesium.

The change of microstructure due to variation in annealing temperature at a fixed position in Armco iron which was given a twisting deformation by the amount to $0.2\pi/cm$, was studied. The surface hardness of some metals were also measured by a Vicker's hardness tester. The results were found to agree satisfactorily with each other.

I. 緒 言

加工變形を受けて内部に相反する二つの内力が作用し、その釣合の下に平衡状態にある金属を加熱するときは原子の熱的運動のため内力は次第に減少し、且つ温度が上昇するにつれ歪みを受けた部分は再結晶の現象を起して益々内力が減少する。温度と共に内力の減衰を測定せるものに Heyn¹⁾、村田氏²⁾等の研究がある。Heyn 及び Bauer はニッケル鋼の常温圧延棒を 850°C で1時間焼鈍するとき軸方向の内力が著しく減少することを測定し、又村田氏は 0.25% C 鋼の常温引拔棒を種々の温度で加熱してその軸方向の内力を測定し、300~600°C の範囲に於て大部分消失することを見出した。又 Krivobok³⁾ は低炭素鋼の常温加工せるものが加熱により内力の除去されることを熱分析によって見出し、650°C 邊の發熱現象は内力の除去と再結晶とによるものとし、佐藤氏⁴⁾も亦同様の研究をした。

振り變形を受けた棒の横断面には常温に於て符號を異にする二つの剪断内力が作用し、棒は振れたまゝ平衡を保て

ゐることは著者の已に求めた處である¹⁾。かくの如き棒を常温以上に加熱すれば原子の熱運動のため棒の受けた振り變形は回復し、或は又再結晶に依て次第に内力は減少して組織は變化する。今までの文献を見るに加熱による残留内力の減衰状況と組織の變化とを兩者對立して同時に研究せるものはない。

こゝに於て著者は剪断内力の加熱による減衰状況を測定すると同時に焼鈍温度による組織の變化を調査して兩者の關係を明らかにした。

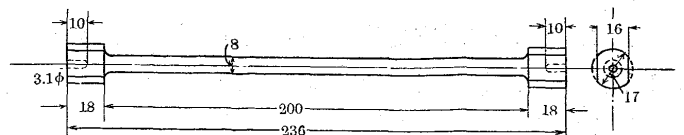
II. 試験片並に測定法

著者は先づ振り加工による残留内力の加熱による消失模様を測定するため第1表に示す4種の金属につき第1圖に示す直径 8 mm, 平行部の長さ 200 mm なる振り試験片を

第 1 表

材 料	Al %	C %	Cu %	Fe %	Mg %	Mn %	P %	S %	Si %
アームコ鉄	—	0.011	—	99.927	—	0.017	0.008	0.025	0.02
0.4% C 鋼	—	0.39	—	—	—	0.35	0.03	0.02	0.25
銅	—	—	99.98	—	—	—	—	—	—
マグネシウム	0.06	—	—	0.02	99.88	—	—	—	0.04

第 1 圖



¹⁾ 著者、金属の研究、13 (1936), 15.

* 大阪帝國大學金属工業研究室

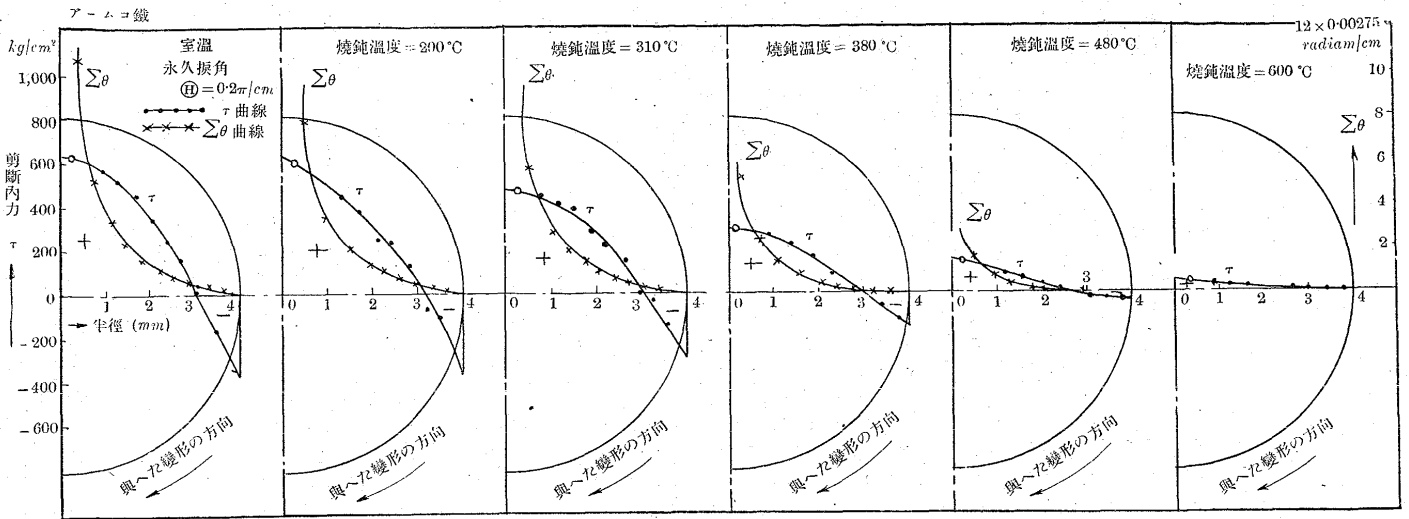
¹⁾ E. Heyn u. O. Bauer, Inst. Zeits. Metallographie, 1 (1911), 16.

²⁾ 村田榮太郎氏、金属の研究、9 (1932), 207.

³⁾ V. N. Krivobok, Trans. A. S. Steel Treat. 8 (1925), 703.

⁴⁾ 佐藤清吉氏、東北帝大理科報告、20 (1931), 140.

第 2 圖



機械仕上げした後工作中に於ける内力を除去して標準組織のものとするため垂直に立てる電気抵抗爐中に針金で試験片を上より吊りして焼鈍し、その彎曲するを防いだ。又表面の酸化を避けるため之を入れた磁製管を凝結式ポンプにつなぎ、管中の空気を充分排除して高度の真空とした。各金属につき、標準組織となれる試験片各8本を取りそれに何れも同一永久捩り變形を與へ、之を常溫に於て2日間放置しその弾性餘効が消滅して平衡の状態に達せるものを100°, 200°, 300°, 400°, 500°, 600°C 及び 700°C の各溫度に30分づゝ各一本を加熱したる後爐中冷却せしめた。

かくて此加熱せる試験片中に残留する剪斷内力を已に發表せる方法¹⁾に依て棒の表面より次第に酸で腐蝕してその平衡を亂し、それに依て生ずる棒の捩れる角度及びそのときの直徑を測定して算出した。

是等の各金属に與へた捩り變形はアームコ鐵及び0.4% C 鋼は $0.2\pi/cm$, Cu は $0.6\pi/cm$, Mg は $0.1\pi/cm$ である。

III. 實驗結果

(i) **アームコ鐵** アームコ鐵についてその試験片の横斷面に残留する剪斷内力 τ を求めた結果は第2表及び第2圖に示されてゐる。圖を見るに残留する剪斷内力は何れの焼鈍溫度に於ても同様の分布状態を示し、外層部に於ては棒の捩れを進めんとする方向に作用し、内層部に於ては棒の捩れを回復せんとする方向に作用し、兩者の捩りモーメントが相等しく互ひに平衡を保つてゐる。 $0.2\pi/cm$ なる變形に於ける弾性變形範圍は中心より $0.016mm$ である故實

際上は半径の全部に亘り粘性變形をしてゐると考へ軸心近くを捩れを回復せんとする剪斷内力の最大點とし、表面を之と反對の捩れを進める剪斷内力の最大點としてよい。是等の内外兩剪斷内力の最大値を見るに200°までは左程の變化なく表面では約 $360 kg/cm^2$, 中心近くでは $630 kg/cm^2$ を示し、兩者の比は2に達しない。310°Cに於ては剪斷内力は少しく減少して表面では約 $300 kg/cm^2$, 中心近くでは約 $500 kg/cm^2$ となり380°Cに於ては著しく減少して何れも約半分となる。尙480°Cに至れば表層部の剪斷内力は非常に減少して約 $26 kg/cm^2$ となるも中心近くに於ける最大剪斷内力は尙 $150 kg/cm^2$ の値を示し前者の約6倍となる。之より見るときは溫度380°C邊までは外層部と内層部との内力の安定度は略同一で内外の残留内力は同じ割合を以て次第に減少するけれども480°Cに於ては中心近くの部分は外層部に比して著しく不安定の状態にあることがわかる。従てこれより高い溫度に於ては内層部では外層部より速かに残留内力が減少する。その結果棒の捩れ變形の溫度による變化を測定するときはアームコ鐵では450°Cまで棒の捩れは回復し、450°C以上に於ては捩れは進行する¹⁾。

第5圖は剪斷内力による中心の周りの捩りモーメントが溫度の上昇に依て減少する模様を示すものである。即ちアームコ鐵に於ては200°C邊まではその減少は僅かであるが200°Cを超えるときは可成り著しくなり300°Cを過ぎて急に減少し、500°Cに於てその大部分は減衰し、尙残留するモーメントは溫度の上昇と共に徐々に減少して700°Cに於て完全に消滅する。

¹⁾ 金属の研究、13 (1936), 15; 61.

¹⁾ 金属の研究、13 (1936), 193.

第 2 表 ア - ム - 鐵

腐蝕層の 番 號 n	n 回腐蝕せる 後の棒の直径 $2r_n$ (cm)	各回の腐蝕中に 於ける尺度の振れ (標點距離Lに對する) l_n (cm/Lcm)	n 回までの腐蝕 による尺度の振れ (單位長に對する) Σl_n (cm/cm)	各層の平均 剪 斷 内 力 τ_n (kg/cm ²)	τ_n による各層の 振りモーメント M_n (cm-kg)
與へた永久振り變形 : $\Theta = 0.2\pi/cm$ 標點距離 : $L = 19\text{ cm}$					
0	0.800	0	0	0	0
1	0.716	4.02	0.212	- 329	- 12.480
2	0.652	3.53	0.397	- 155	- 3.644
3	0.561	5.10	0.666	+ 46	+ 1.188
4	0.500	4.29	0.892	+ 175	+ 2.407
5	0.438	5.71	1.192	+ 247	+ 2.648
6	0.362	8.65	1.647	+ 365	+ 3.499
7	0.280	13.34	2.349	+ 468	+ 3.120
8	0.208	18.48	3.322	+ 526	+ 1.795
9	0.139	36.27	5.231	+ 573	+ 0.940
10	0.068	106.32	10.827	+ 625	+ 0.398
				$0\tau_e'' =$	+ 630
焼 鈍 温 度 : 200°C					
0	0.800	0	0	0	0
1	0.732	3.00	0.157	- 323	- 10.123
2	0.666	2.50	0.289	- 102	- 2.642
3	0.602	3.80	0.489	- 82	- 1.658
4	0.520	4.05	0.703	+ 140	+ 2.877
5	0.446	4.50	0.939	+ 236	+ 3.203
6	0.384	7.00	1.308	+ 230	+ 1.930
7	0.290	12.60	1.971	+ 388	+ 3.271
8	0.193	27.05	3.395	+ 458	+ 2.082
9	0.090	85.20	7.879	+ 551	+ 0.919
				$0\tau_e'' =$	+ 607
焼 鈍 温 度 : 310°C					
0	0.800	0	0	0	0
1	0.750	1.95	0.103	- 310	- 7.307
2	0.690	2.00	0.208	- 134	- 3.314
3	0.610	3.00	0.366	- 29	- 0.780
4	0.552	3.30	0.539	+ 8	+ 0.124
5	0.479	3.90	0.745	+ 157	+ 2.366
6	0.406	5.50	1.034	+ 225	+ 2.568
7	0.338	7.90	1.450	+ 284	+ 2.159
8	0.264	9.50	1.950	+ 400	+ 2.018
9	0.193	16.55	2.821	+ 420	+ 1.220
10	0.096	56.48	5.794	+ 468	+ 0.785
				$0\tau_e'' =$	+ 477
焼 鈍 温 度 : 380°C					
0	0.800	0	0	0	0
1	0.730	1.27	0.067	- 133	- 4.274
2	0.652	1.50	0.146	- 57	- 1.660
3	0.570	2.00	0.251	- 1	- 0.023
4	0.491	2.43	0.379	+ 59	+ 1.037
5	0.422	3.50	0.563	+ 81	+ 0.901
6	0.319	6.65	0.913	+ 167	+ 1.853
7	0.223	10.20	1.450	+ 238	+ 1.359
8	0.136	19.36	2.469	+ 271	+ 0.598
9	0.070	53.20	5.269	+ 283	+ 0.161
				$0\tau_e'' =$	+ 312
焼 鈍 温 度 : 480°C					
0	0.800	0	0	0	0
1	0.721	0.30	0.016	- 26	- 0.955
2	0.656	0.37	0.035	- 20	- 0.482
3	0.580	0.45	0.059	- 2	- 0.047
4	0.522	0.55	0.088	+ 5	+ 0.070
5	0.440	1.20	0.151	+ 13	+ 0.196
6	0.356	2.15	0.264	+ 30	+ 0.319
7	0.259	3.50	0.448	+ 69	+ 0.486
8	0.192	6.10	0.769	+ 82	+ 0.226
9	0.104	16.30	1.627	+ 123	+ 0.192
				$0\tau_e'' =$	+ 145

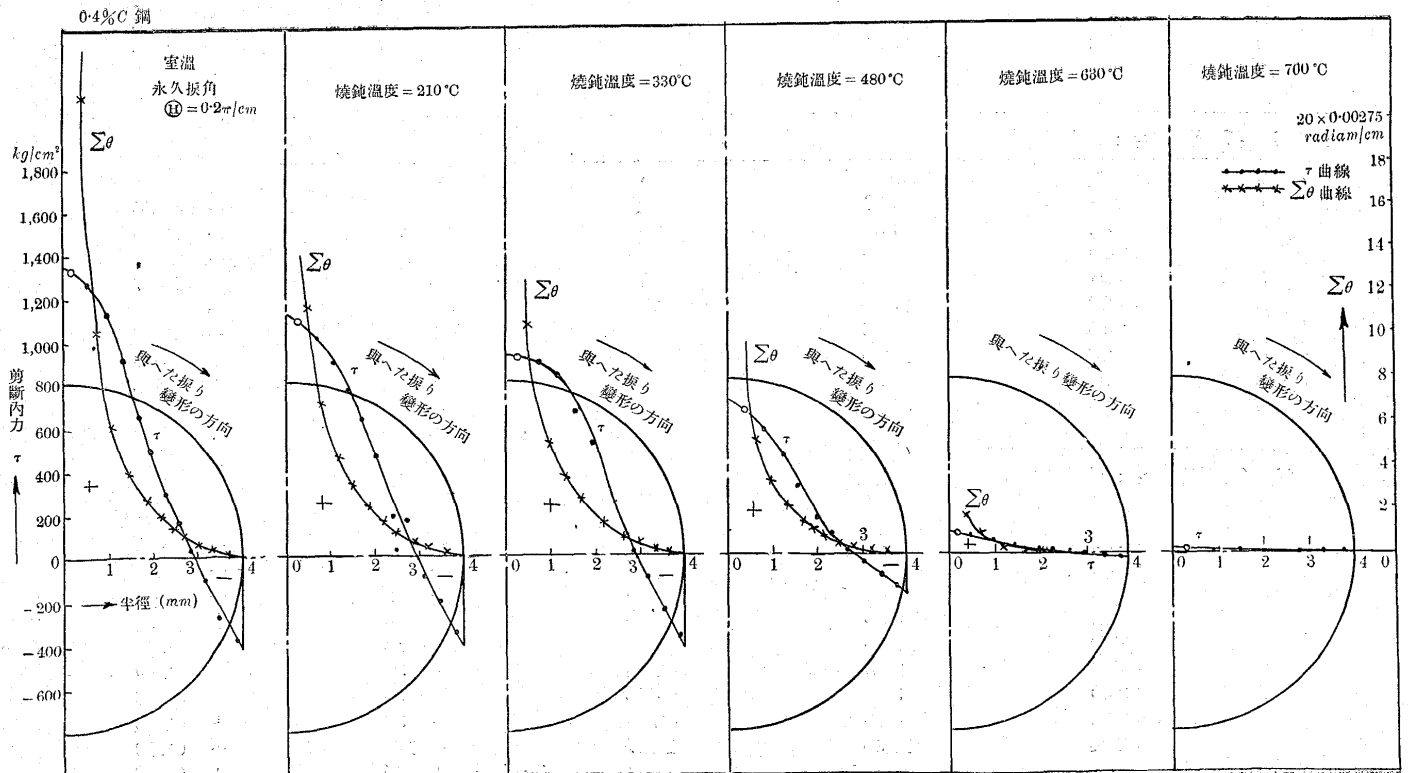
腐蝕層の 番 號 n	n 回腐蝕せる 後の棒の直径 $2r_n$ (cm)	各回の腐蝕中に 於ける尺度の振れ (標點距離Lに對する) l_n (cm/Lcm)	n 回までの腐蝕 による尺度の振れ (單位長に對する) Σl_n (cm/cm)	各層の平均 剪 斷 内 力 τ_n (kg/cm ²)	τ_n による各層の 振 り モー メ ン ト M_n (cm-kg)
焼 鈍 温 度 : 600°C					
0	0.800	0	0	0	0
1	0.720	0.05	0.003	- 5.0	- 0.180
2	0.650	0.10	0.008	- 5.3	- 0.136
3	0.580	0.20	0.018	- 6.6	- 0.137
4	0.490	0.30	0.034	+ 0.9	+ 0.018
5	0.420	0.50	0.061	+ 1.2	+ 0.014
6	0.350	0.70	0.097	+ 12.2	+ 0.100
7	0.280	1.20	0.161	+ 19.0	+ 0.104
8	0.220	1.30	0.229	+ 34.3	+ 0.101
9	0.130	6.00	0.445	+ 41.4	+ 0.091
				0 $\tau_e'' =$ + 49.5	+ 0.028

尙この振り變形を與へたアームコ鐵の試験片を 700°C 以上の温度に於て焼鈍し、之を表面より腐蝕するに棒の表面に多くの螺旋狀形の幾條かが現はれる。此の螺旋の軸に對する傾きは棒に與へた振り變形の螺旋の傾きと同一である。焼鈍温度が之より低いとき、或は又全然焼鈍しないときは是等の螺旋は現はれない。

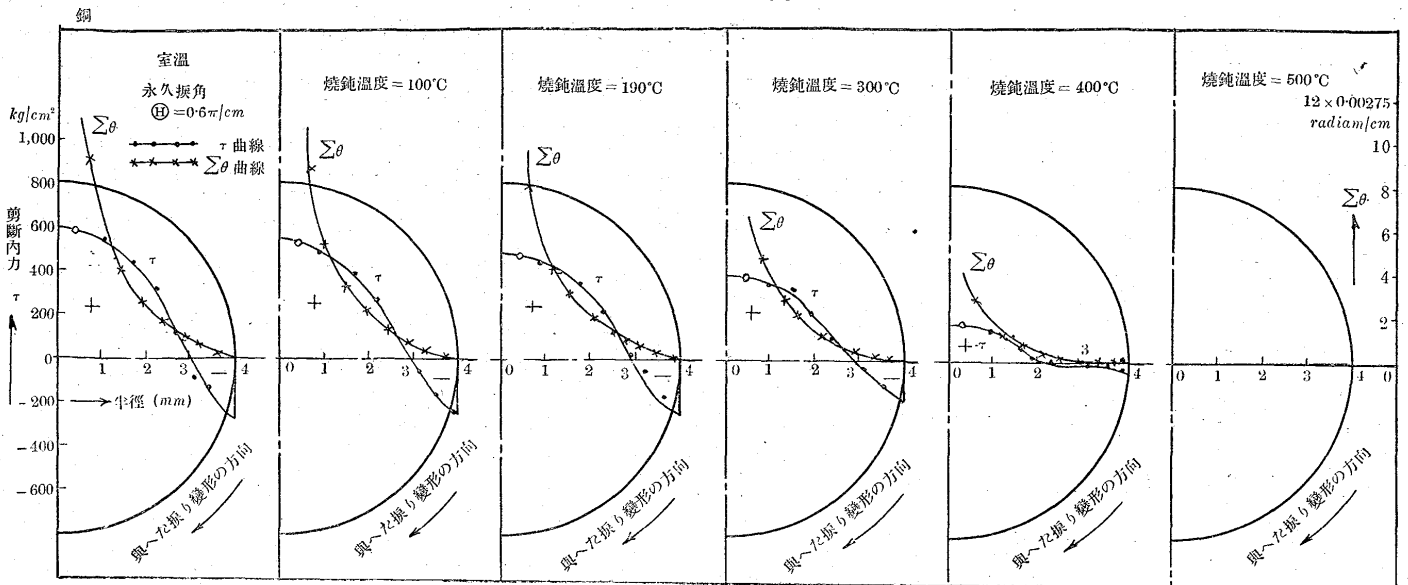
(ii) 0.4% C 鋼 第3圖は 0.4% C 鋼に關する結果である。數値は紙數の關係上省略することとする。之を見るに剪斷内力は 330°C 邊までは徐々に變化し、480°C に至つて約半減し、630°C で其大部分が減衰し 750°C に至れば内部に僅かに剪斷内力の存在が認められるに過ぎない。又内外兩剪斷内力の最大値を比較するに常温に於ては

約3.5の値を有し、330°C に於ては2.5となり、480°C に至れば4に増加しその後は大體この値を持して剪斷内力は減少する。従て常温より 330°C 邊までは内層部の最大内力の減少度は表面のそれに比して大であり、330°C より50°C 近くまでは之と反對に表面の剪斷内力の減少度が内層部のそれよりも大であり、その後は兩者同一割合を以て減少すると考へられる。第6圖に於ける振りモーメント對焼鈍温度曲線を見るに 0.4% C 鋼は 350°C 邊までは振りモーメントは極く徐々に減少し其後急激となり 600°C に至て微小となり、尙残留するモーメントはその後温度の上昇と共に徐々に減少し 750°C に至て完全に消滅する。第6圖に示す4種の金屬中剪斷内力の完全に消滅する温度

第 3 圖



第 4 圖



は 0.4% C 鋼では約 750°C, 又その著しく急減する温度は 400~600°C で何れも最も高い。炭素鋼に於てもアームコ鐵と同じく 700°C 以上に焼鈍するときは螺旋状様の幾條かが現はれる。

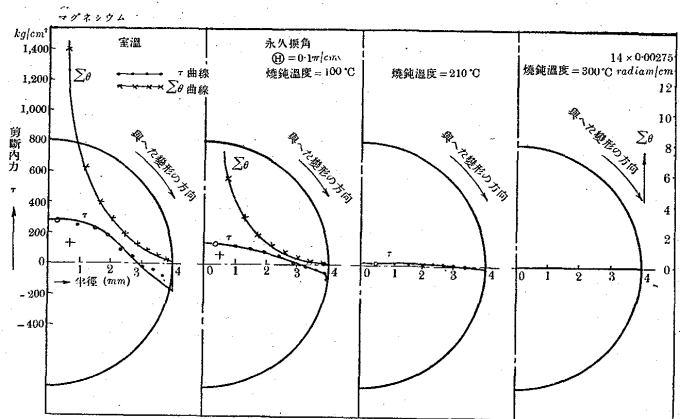
(iii) 銅 0.6 π/cm の振り變形を與へた銅を種々の温度で焼鈍し、その剪断内力を測定した値は第 4 圖に示されてゐる。數値は省略する。銅に於ても鐵鋼と同じく温度の上昇と共に剪断内力は次第に減少してゐるが 190°C に於て已に或程度の減少を示し 300°C を經て 400°C に至るときは著しく小となり、500°C に於ては殆んど完全に消滅する。300°C までの内外兩剪断内力の最大値の比は約 2 内外なるも焼鈍温度が 400°C となるときはその比は約 6 となり、軸心部の剪断内力は表面のそれに比して著しく大きく、丁度アームコ鐵の 480°C に於けると同様の現象を示し著しく不安定の状態となりその後の残留内力の減衰度は軸心部の方が著しく大である。

是等の剪断内力による振りモーメントと焼鈍温度との關係は第 6 圖に見る如く常温より 300°C 邊までは殆んど直線的に減少し、300°C を超えると減少は急に著しくなり、480°C に於て大部分消失しその後於ける振りモーメントの減少は徐々に 550°C に於て残留内力は完全に消滅する。

(iv) マグネシウム 標準組織の Mg 棒 3 本を取り、之に 0.1 π/cm の振り變形を與へ之を 100°, 210°C 及び 300°C で各 1 本づつ 30 分間焼鈍した後測定した結果を示すと第 5 圖の如くなる。

圖を見るにこの Mg の 0.1 π/cm なる振り加工に對し常

第 5 圖



温に於て有する剪断内力の分布は表面より半径約 2mm の邊に至るまでは直線的に變化し、その後半径が減少するも餘り剪断内力は増加せずして軸心近くの剪断内力は表面に於ける剪断内力の 2 倍以下である。而してこの棒を 100°C で 30 分間焼鈍するときはその剪断内力は約半減し、210°C に至れば著しく小となり僅かに内力の残留するを認めるに過ぎない。尚 300°C に熱すれば残留内力は圖上に表はし得ざる程小となる。100°C 並びに 210°C に於ける軸心部の残留内力と表面の残留内力との比は 2 以下で常温と同じ比率を有し、内外同一割合を以て終始内力が減少してゐる。

振りモーメントと焼鈍温度との關係を圖に描けば第 6 圖の如く常温より温度が上昇すると共に殆んど直線的に減少し 200°C に於てその大部分が減衰する。之れを他の金属に較ぶれば Mg に於ては残留内力の減少は著しく速かで 100°C 以下の低い温度に於て約半減する。然れども以上諸金属の融解點とその残留内力が完全に消滅する温度との割

合は第3表の如く何れも約0.5となつてゐる。従て Mg の残留内力が容易に除去されるのはその融解點が低いによるため金属の融解點を標準に取れば何れも融解點の約1/2の温度で残留内力が消滅する。

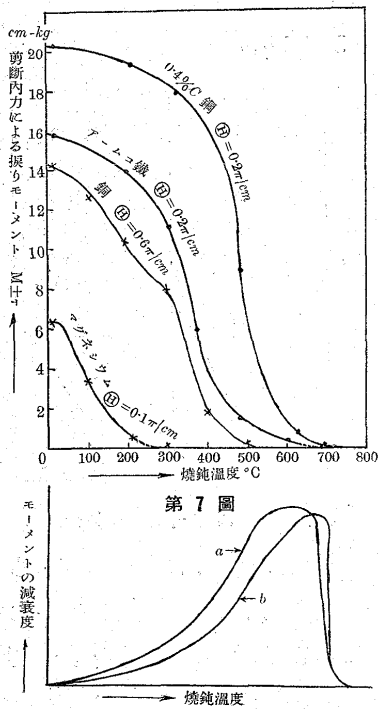
第3表

材 料	融解點	内力の消滅點	兩者の割合
アームコ鐵	1,530°	~750°	0.49
0.4% C 鋼	1,480°	~750°	0.51
銅	1,083°	~550°	0.51
マグネシウム	650°	~320°	0.49

IV. 實驗結果の考察

一定の振り變形を受けて平衡状態に達した丸棒を種々の温度で焼鈍したときの剪断内力の減衰状況、従てこの剪断

内力による振りモーメントの變化を見るに第6圖に示す如く金属の性質及び變形の大きさに依て多少の相違はあるが一般に内力の減衰は三つの階段に區別することが出来る。即ち第一階段は常温より一定の焼鈍温度に至るまでの徐々の減少である。第二階段は焼鈍温度更に上昇して残留内力の最も急激に減少する部分で其大部分は此温度範囲内にて消失する。



る。又第三階段は焼鈍温度が更に上昇して残留内力の完全に消滅する部分である。村田氏¹⁾は0.25% C 鋼の常温引拔棒についてその内部張力及び壓力の温度による消滅状況を測定したが其結果は大體上記の結果と一致してゐる。

剪断内力の温度による變化を見るに炭素鋼(第3圖)及び Mg (第5圖) に於ては何れの焼鈍温度に於ても軸心近くに於ける正の最大内力と表面に於ける負の最大内力との比 μ は略相等しく、従て二つの最大内力は同じ割合を以て減少しその安定度は何れの温度に於ても同一である。然るにアームコ鐵(第2圖)及び銅(第4圖)に於ては μ は夫々 380° 及び 300°C に至るまでは略同一で兩層の安定度

は相等しいが是等の温度以上に於ては μ の値は著しく増大して内層の安定度は外層のそれに比して著しく小となる。又振りモーメントの減少を考ふるに外層部の最大内力は内層部の最大内力に比して著しく小さく約1/6程度である故残留内力の大きさの點より見れば内層は外層より不安定な状態にある。従て温度の上昇による減衰度は内層の方が大である。而して棒の受けた加工による各點の變位の割合を見るに中心より遠ざかる程その割合大きくして外層は内層より不安定な状態にある。かくの如く兩最大内力の大きさと加工變位の割合との兩見地より見るときはその安定度は互ひに相反する。従て棒を焼鈍するときはこの相反する安定度の合成効果が現れる故内外兩層の残留内力の減衰度は何れが大きいかは不明である。勿論與へた振り變形度が非常に大なるときは内層の内力は著しく増大する故¹⁾内層が外層より一層不安定なことは豫想される。又アームコ鐵や銅に於ては焼鈍温度が或程度に達するときは μ の値が著しく増大する故之より以上の焼鈍温度に於ては内層が外層よりも減衰度の大であることも想像される。

此内外兩層に於ける焼鈍による振りモーメントの温度一度に對する減衰度を考ふるに焼鈍の始めはその度小なるも温度高まるに従ひ著しく増大し、最大に達せる後は急激に減少して減衰度曲線は第7圖の a 或は b の如き形を取るものと考へられる。而してこの a, b 曲線は外層或は内層の減衰度を表はすものと見るのであるがその何れに相當するかは振り變形を與へた棒を焼鈍するときに現はれる振り變形の變化に依て判定することが出来る。

V. 顯微鏡組織

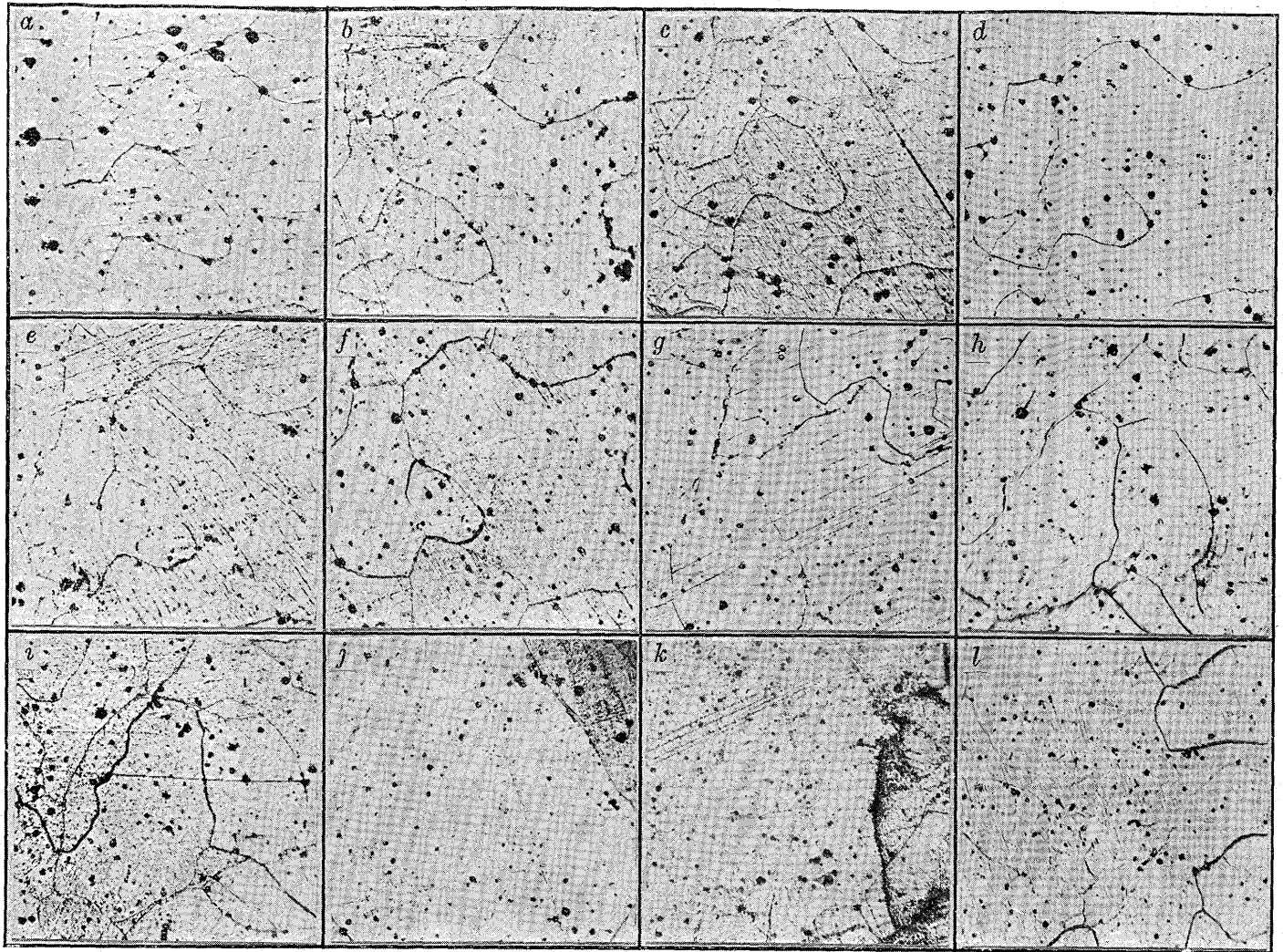
緒言に述べた如く加熱による残留内力の減衰状況と組織の變化との關係を求むるためアームコ鐵の $0.2\pi/cm$ の振り變形を受けた試験片(第1圖に示す寸法を有するもの)を高度真空爐中で種々の温度に30分間加熱して顯微鏡組織の變化を見た。歪みたる結晶粒の温度による變化を見るため同一個所を顯微鏡寫眞にて撮影した。即ち一定の温度に加熱して後爐中冷却し、之を取出してその表面を極めて軽く5零のエメリー紙で一度擦つた後ラシャ磨きした。それ故常温と 950°C までの間約10回に亘る表面層の磨滅は極く僅かである。従て寫眞に現れる結晶粒の大きさの變化は温度による變化と見ることが出来る。第8圖に示すものは棒の表面に極く近い個所である。

¹⁾ 村田氏、金屬の研究、6 (1929), 97.

¹⁾ 著者、金屬の研究、13 (1936), 10.

第 8 圖

0.2 π/cm の永久振り変形を受けたアームコ鉄の結晶粒の焼鈍による変化 (直径 8mm 棒の表面に極く近い處) 焼鈍時間=30 min × 100



(a) 常温加工のまま (b) 焼鈍温度=225° (c) 焼鈍温度=300° (d) 焼鈍温度=400° (e) 焼鈍温度=510°
 (f) 焼鈍温度=560° (g) 焼鈍温度=630° (h) 焼鈍温度=720° (i) 焼鈍温度=850° (焼鈍のまま) (j) i の
 表面を軽く磨いたもの (k) 焼鈍温度=950° (焼鈍のまま) (l) k の表面を軽く磨いたもの

之を見るに 200°C 以上に於ては結晶粒の入り線の存在を見るの外 400°C 邊まで殆んど変化なく 500°C より少しく結晶粒の角が丸くなり、560°C に於て可成り丸くなり 630°C に於ては著しく成長し、720°C より形が少しく變化する。之を更に 850°C で 30 分間保持した後磨く前に撮影せるものが (i) 圖で 720°C の舊結晶粒の境界線と 850°C で成長した新結晶境界線とが同時に現れてゐるから結晶粒の成長の模様をよく知ることが出来る。これを軽く磨き直して腐蝕した後撮つた寫眞が (j) 圖で境界線は全く消失して 850°C に於て生じた新境界線が現れる。

次にこれを 950°C で 30 分間焼鈍した儘のものを前同様に撮ると (k) 圖の如く 850°C と 950°C との兩結晶粒境界線が現れる。之を磨き直して腐蝕したものが (l) 圖で全く標準組織となつてゐる。焼鈍による結晶境界

線の移動については Carpenter¹⁾ の Sn 98.5%、Sb 1.5% の合金についての研究、壽時氏²⁾ の Sn—Sb 合金についての研究があるがこゝに求めた如き鐵についての文献はまだ見ない。

以上の結果は加工直後に存在する結晶粒の中最も安定なる結晶が周囲の不安定なる結晶を蠶食して成長することを示すものである。之を温度の上昇による残留内力の減少曲線(第6圖のアームコ鉄曲線)と比較するに残留内力の著しく減衰する温度は結晶生長の著しい温度と一致するを見る

硬度の測定 金属が常温加工を受けるとき硬化し、之を焼鈍するとき軟化することは已によく研究されてゐる。著者は二三の炭素鋼について振り加工を受けた丸棒の表面硬

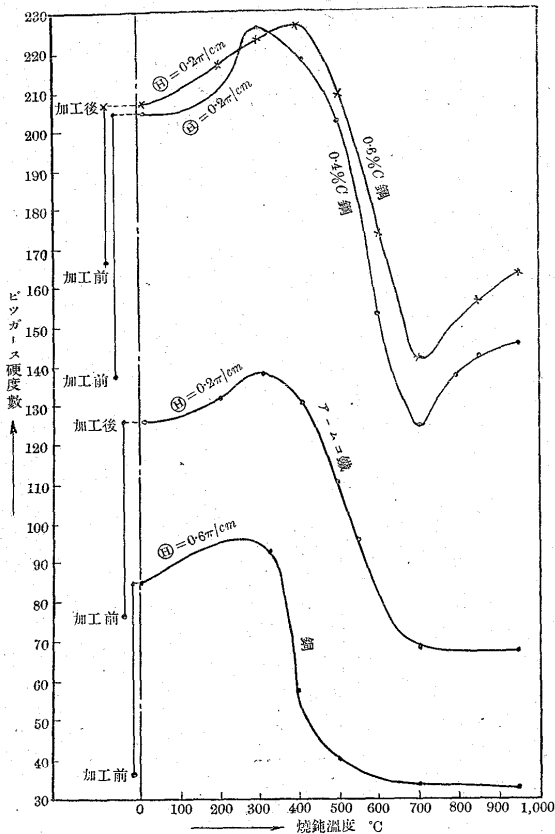
¹⁾ Carpenter, Journ. Inst. Metal, 2 (1920), 83.

²⁾ 壽時富彌氏、金属の研究、5 (1928), 325.

度をピッカース硬度計に依て測定し焼鈍による硬度の變化を測定した。

第1圖に示せる試験片を標準組織にした後所要の振り變形を與へその中央15cmを切り取て試験片とした。何れも高度真空中で焼鈍し表面の酸化するのを防ぎ所要の温度に達した後30分間そのまま保持して後電流を遮断して爐中冷却した。かゝる試験片の表面を各温度につき10ヶ所測定してその平均値を取り、第9圖にその測定結果を示し

第9圖



た。何れの金属に於ても常温振り加工に依て著しく硬化し、これを加熱するときその硬度は300°Cを過ぎるまで焼鈍温度と共に少しく増加し、その後急に減少し700°C邊まで軟化する。アームコ鐵、銅等に於てはその後温度が上昇するも何等の變化を認めないが0.4% C及び0.6% C鋼に於ては700°C以上で再び硬化する。

以上硬度の變化を剪断内力の變化(第6圖)と比較するに300°Cを過ぎて著しく軟化せる範圍に於ては剪断内力は著しく減少する。又アームコ鐵の顯微鏡組織(第8圖)と比較するに軟化し始める頃より結晶粒の角が次第に取れて丸味を帯び結晶粒の生成するを示してゐる故軟化は内部歪の除去と結晶粒生長とによることがわかる。アームコ鐵に於ては700°C以上の顯微鏡組織の示す如く多少新結晶が

發生しても餘り硬度の變化なく、軟化は主として内部歪の除去に歸因することを示してゐる。

鐵、鋼を熱すれば300°C邊までは次第に硬化する現象に就いては已に本多博士の説明がある。即ち常温加工を受ける結晶粒は大なる内部歪を受けてゐて不安定な状態にあるが之を少しく熱すれば各部多少熱膨脹の度を異にする故更に結晶粒の分裂を生じて硬化するものである。振り加工を受けたアームコ鐵の顯微鏡寫眞に於て200°C以上に無数のまり線の存在するを見るは此の説明を裏書するものである。

VI. 總 括

(1) 永久振り變形を與へたアームコ鐵、0.4% C鋼、銅及びMgの丸棒の横斷面に於ける残留剪断内力に及ぼす温度の影響を測定した。

(2) アームコ鐵に於ては残留内力は200~500°Cの範圍に於てその大部分が消滅し、約750°Cに於て完全に消滅した。0.4% C鋼は300~600°Cの範圍に於てその大部分が消滅し約750°Cに至て完全に消滅すると見た。又銅に於ては50~450°C, Mgに於ては40~200°Cの範圍に於て大部分の残留内力が消滅し、前者は約550°C, 後者は約320°Cに於て完全に消滅した。

(3) こゝに求めたる4種の金属に就いて見るにその残留内力の完全に消滅する温度は各金属の融解點の約1/2に相當してゐる。

(4) 永久振り變形を受けたアームコ鐵棒を種々の温度に焼鈍しその斷面の一定個所を顯微鏡寫眞に撮影して温度による結晶粒の變化を測定し残留内力の消滅狀況と比較した。残留内力の著しく減少せる範圍に於てその結晶粒は成長し始め、大部分消滅せる後より著しく成長するを見た。又850°及び950°Cの焼鈍前後に於ける舊結晶境界線と新結晶境界線とを一時に撮影して結晶粒成長の経路を見た。

(5) 永久振り變形を受けた金属棒の表面硬度をピッカース硬度計で測定し焼鈍による變化を測定して残留内力の消滅狀況と比較したるに残留内力の著しい減少範圍に於て著しく軟化するを見た。

終りに臨み本研究御懇篤なる御指導を賜りし東北帝大總長本多光太郎先生に厚く感謝の意を表する。