

論 說

軟鋼の降伏點發生機構

(日本鐵鋼協會第 9~10 回講演大會講演 昭 7, 8 年)

黒田 正夫*

ON THE ORIGIN OF THE YIELD POINT OF MILD STEEL.

by KURODA—Masawo, Kogaku hakusi.

SYNOPSIS:—

A hypothesis is proposed for the yield point phenomena of soft steel. When an annealed soft steel is subjected to mechanical stress, it reveals a palier in the stress-strain diagram as well as Lüders' lines on the surface of steel. These phenomena are particular for only annealed soft steel, and almost all other alloys and metals do not show them. The author sought the cause of the phenomena in the special structure of the soft steel, which is composed of soft ferrite and hard pearlite or cementite. A little amount of cementite segregates out along the boundary of the ferrite crystallines and forms honey-comb-work of hard boundary structure. When such structure is subjected to heavy load, the boundary structure yields at first, so the thick mass of soft ferrite strains suddenly until it can sustain the same amount of stress. This transition of stress appears as the palier in the stress-strain diagram, and the trace of the destruction of the honey comb structure forms the Lüders' lines on the surface of the steel. The author explains this hypothesis from different directions of the characters of soft steel.

第 I 部 實 験

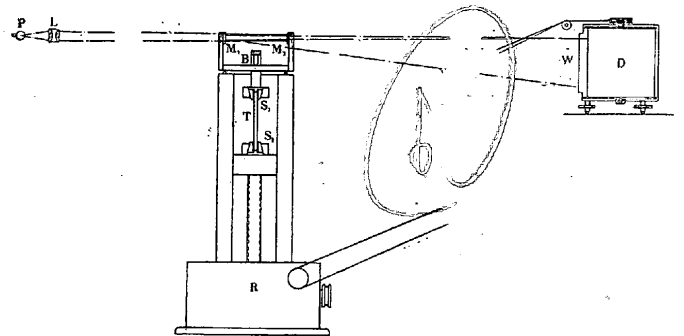
I. 常 温 抗 張 試 験

1. 装 置

1) 特殊緩徐抗張試験機 抗張試験の間起きる現象を詳しく検討するために、索引速度の甚だ小さく、且、測力計のふれによる摺みの動きが極めて小さい試験機を設計、製作した。即ち測力計の動きを小さくするため、ふれの極めて小さな鋼梁をその測力要素とし、小さなふれは光學挺子により擴大して読み、或は自記せしめた。

その機構は第 1 圖に示すやうなもので、試片 T を摺み S_1 及び S_2 で銜へさせ、上の摺み S_1 は鋼梁 B の中央から釣り下げる。下の摺み S_2 は減速装置 R に連結せしめて、毎時 1cm の速度で引き下げさせる。試片に加へられた荷重は鋼梁の撓みを以て測る。その撓みは梁に固定した鏡 M_1 及び M_2 の角度の變化を以て讀む。即ち、點光源

第 1 圖 特殊緩徐抗張試験機

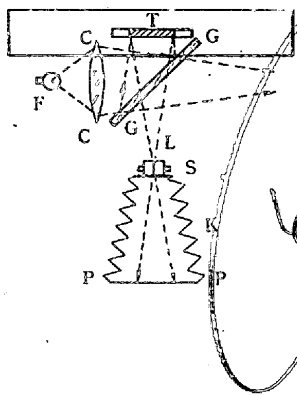


P の像を收光鏡玉 L 及び鏡 M_1, M_2 を以て回轉暗箱 D 中の臭素紙上に結ばせて置けば梁の撓みに正比例して、此の像は臭素紙上を上下するから、その變位によって荷重を知る。一方臭素紙は回轉圓筒に張り、圓筒は減速装置の動き、即ち試片の伸びに比例して動くやうにしてあるから、光源の像もこれに比例して臭素紙上を左右に動くであらう、依て臭素紙には縦軸に荷重、横軸に摺み、或は試片の伸びが焼きつけられる。

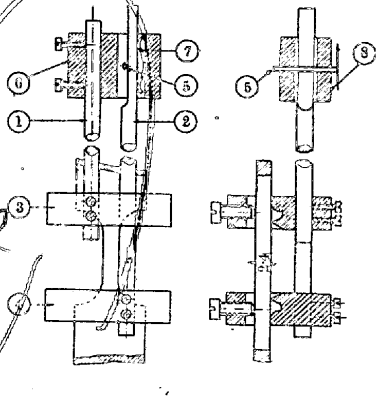
2) 試片の表面寫真撮影装置 緩徐索引試験機で抗張試験しつつ、その間に試片の表面變化を寫真に撮影するため

* 理化學研究所

第2圖 試片撮影装置



第3圖 測伸計



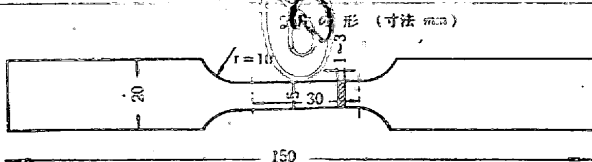
に、次のような装置をした。試片 T と寫真器 K との間に透明平面硝子 G をはさみ、直射收光照明をなした。即ち第 2 圖に於いて光源 F から光を收光鏡玉 C で集め、硝子 G、試片 T で反射せしめて寫真鏡玉 L の主平面に光源の像を結ばせて、乾板 P 上に直射せしめた。撮影は開閉器 S で適當の間隔(多くは 30 秒、時に 1 分)に於いて適宜な露出を與へた。露出を與へる毎に緩徐試験機の記録用光束を遮ぎって、寫真と荷重-伸曲線との關係を明らかならしめた。

3) 測伸計 かゝる塑性變形までに及ぶ研究には、彈性變形測定用のマルテン式の如き測伸計は用ひられず、又、試験機附屬の普通の自記装置では粗くて用をなさない。そこで第 3 圖のやうな測伸計を設計、製作した。即ち 3, 4 を以て試片の標點を双端を以て押へ、その各より棒 1, 2 を出し、棒 1 に軸 5 を有する軸承 6 を固定する。棒 2 の一端を平らに仕上げてその面をもつて軸 5 を擦つて、棒 1 及び 2 の變位を此の軸 5 の回轉に直す。即ち標點の變位を軸 5 の回轉として、これを目盛板 8 と指針とで讀むのである。かくして、目盛板の 1 回轉を 10mm、1 目盛(1mm)を 0.1mm とすることは容易で、目分量で 0.01mm までの變位を讀み得る。標點距離を 20mm にとつても、目盛で 0.5% まで、目測で 0.05% まで讀み得るから、剛性率も測定し得、塑性變形の研究には充分の精度をもつ。後に變位讀取に普通のダイヤル・ゲージを使用して、0.01mm の示差變位を讀み得るやうにした。

第4圖 試片の形狀

第1級試片の組成成分

成分	C	Si	Mn	P	S	組織
軟鋼板 1	0.04	0.01	0.34	0.050	0.066	鋼線層状組織を有
炭素鋼板	0.07	0.01	0.27	0.033	0.028	冷間延ばしの



2. 試料 始めは市販の軟鋼板を、後には八幡製鐵所製的美装鋼板を用ひた。その組成は次のやうなものである。今後試片の形は特に断らない限り、次のやうな板状試片に製作した(第4圖参照)。平行部はミリングでかゝる形の成形双物によつて仕上げ、表面は研磨機仕上げをした。

平行部は標點を打たない時は 20mm として、此の 20mm で全體の伸びを割た商で伸張率を示した。掴みの部分は加熱爐、冷却槽、測伸計その他の都合で更に長くすることもある。

此の材料は試片の形になした後、900°×30min 焼鈍することを普通とした。焼鈍には真空爐を用ひた。即ち水晶管に試片を入れ、摺合せにより真空装置につなぎ、加熱時、螢光がとぶ程度に排氣した。ために顯微鏡的に磨いた面も少しも犯されず曇りも脱炭もない。水晶管は外部から白金電氣爐により加熱した。

3. 結果

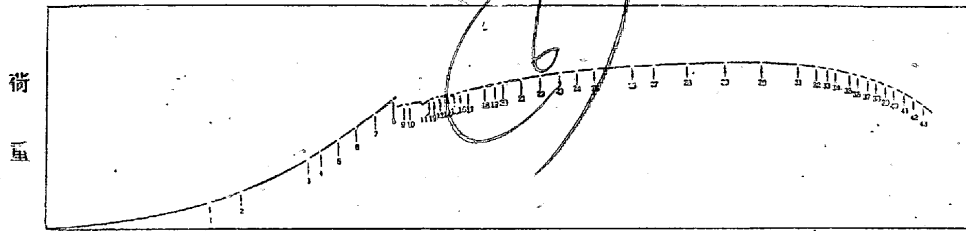
1) 降伏點踊場と Lüders 縞との關係(第4圖) 緩徐抗張試験機で抗張試験中試験片の表面變化を撮影した。その結果は第5圖に示す通りで線圖は荷重-伸曲線で、寫真 1~43 はその表面變化で寫真番號は曲線に入れた切目の番號に相對應する。寫真 1~5 には何の變化も現れない。寫真 5~8 の間には試片の一方の側に小さな縞模様が見られる。これが Lüders 縞で、試験が進むにつれ發達して行く。

ところが寫真 8~59 に到て俄然平行部の中央に大きく現はれ、11 までの間に平行部を覆ひつくす。15 に到て殆んど全部を Lüders 縞は覆ひ取り、その後は反てそれまでに現はれた縞が不明瞭となつてゆく。寫真 20 頃では平行部は一様に梨地模様となつて Lüders 縞の境などわからなくなる。寫真 29 に到てこの梨地となつた平行部の下から約 1/3 の點に局部收縮が始り、その括れから切斷に到る。

一方荷重-伸曲線では 1~3 は掴みのづれが次第に減じてから 8 に彈性比例部分を示してゐる。然るに 8 に到て突然荷重は落ち、9, 10, 11、と略同じ荷重の下に伸びだけが増す所謂「降伏點踊場」を生じてをって、11 に到てやみ、12 からは荷重と伸びとは共に漸騰して、17 に到て上部降伏點 8 と同じ荷重に回復してゐる。その後も漸騰をつゞけ 28 で最大荷重に達し、それより局部收縮を始めて切斷に及んでゐる。

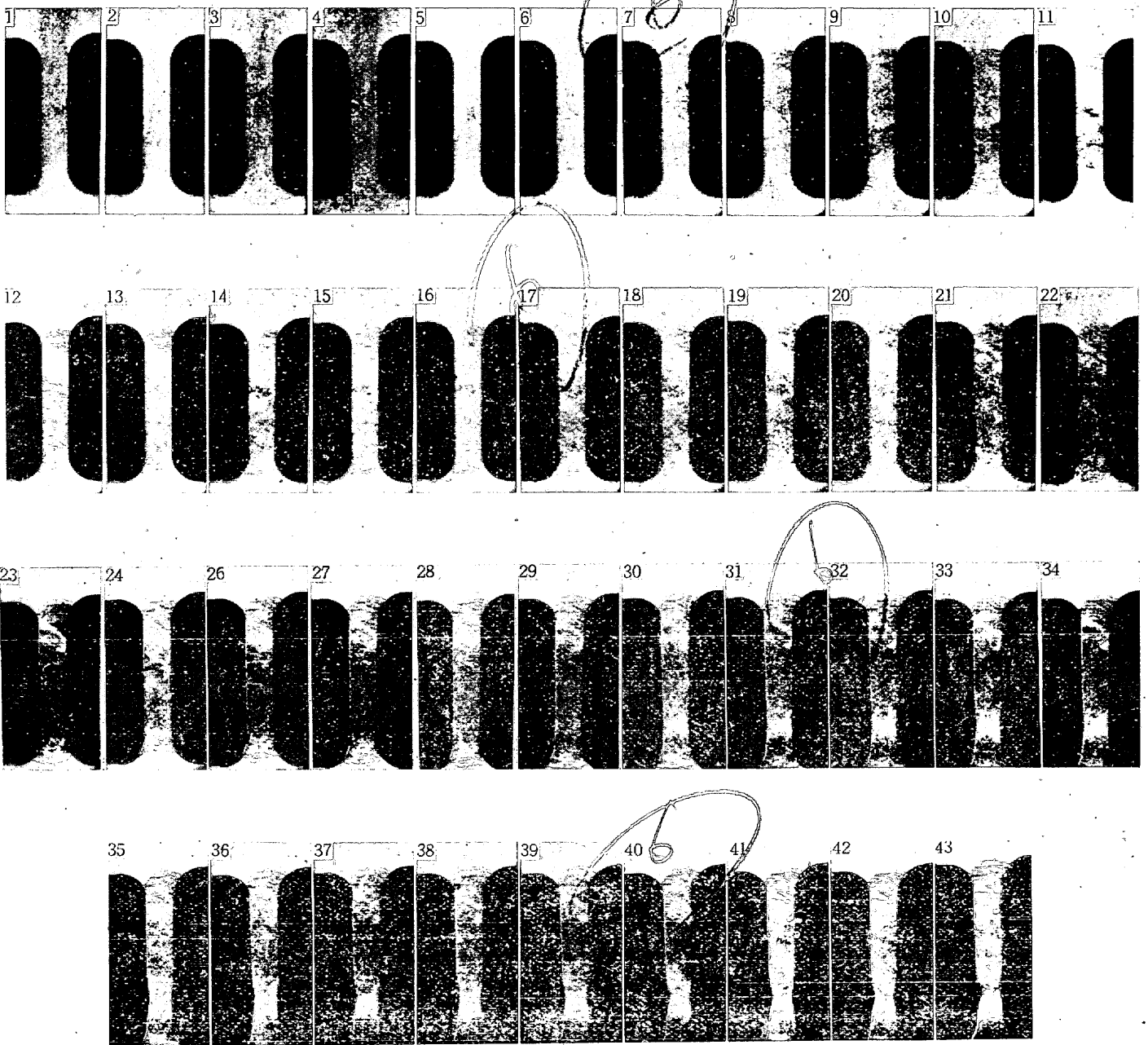
此の表面變化と荷重-伸曲線とは全く對應して、殊に踊場と Lüders 縞との關係は全く一致してゐる。共に 8-9-

第 5 圖



伸び

第 5 圖

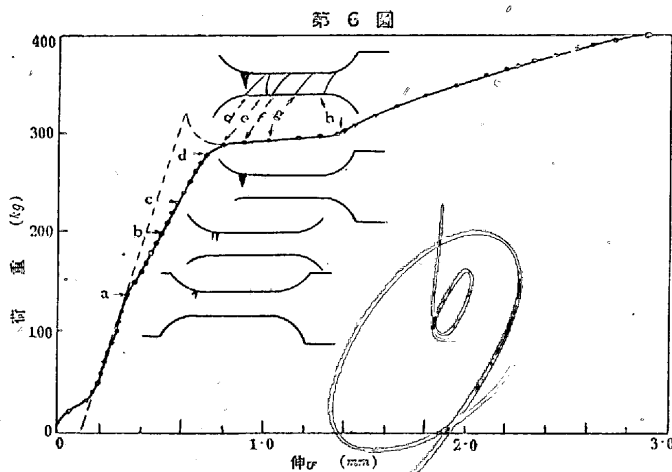


10-11 の間に出で、その發生原因が全く同一現象に因ることを示してをる。此の二つの「踊場の存在」と「Lüders 綫の發生」との現象を以後、降伏點現象と呼ぶ。

尙 28 以後に於いて、荷重の下降と局部收縮との關係は明瞭に觀察することが出来る。

5 より 8 までに現はれた小さな Lüders 綫であるが、之は更に精密に測伸計を用ひて研究すると、次の如く引張荷重の加り方が不完全であつたことがわかつた。

2) 比例限界と上部降伏點 測伸計を使用して伸びを精密に測定しながら、Lüders 綫發生の模様を觀察して見ると、上部降伏點以下で比例法則が崩れるのは主に片荷のため曲げ應力が加はるためであることを知た。第 6 圖はその結果であつて、荷重-伸曲線に於ける a, b, c, d, e, f, g, h の諸點に於いて發生した Lüders 綫の見取圖を曲線の右側に列べたものである。



140 kg 程の點 a で比例部分は一應終り、之を以て比例限界となすべきやうであるが、更に荷重が増すと再び前と平行な比例直線が現はれて、弾性比例を示すやうである。それが又 200 kg の點 b で再び崩れるが、その後又前に平行な直線が現はれ 235 kg の點 c で崩れるまでつく。一方試片の表面には上記の點 a, b, c で急に小さな Lüders 綫が現はれて、a, b, c と突發的に發達して行く。

この Lüders 綫の現はれた場所は縁邊應力の最も大なる點であるが、更に張力以外に少しの彎曲應力までが重なつてかゝれば、此の點には特に大きな應力が生じなくてはならない、故に若し、不均一荷重のため彎曲應力が生じた場合には此の點だけ局部的な大きな應力を生じ、ために局部的に降伏點を超えて、Lüders 綫も發生したと考へられ、ために全體的には比例法則が破れるやうに見られる。

故に完全な引張應力を加へれば、かゝる Lüders 綫の

發生も、弾性比例の崩れもなくなり、上部降伏點までは、弾性比例は保たれるのである。この現象は J. G. Dotcherty も證明してをる。

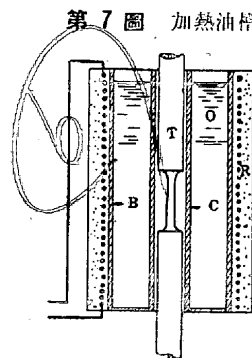
3) Lüders 綫の限界 降伏點踊場で Lüders 綫は平行部を覆ひ盡すが、その後、荷重を増加すると、Lüders 綫は平行部より肩の方へ喰ひこんで行き、同時に前に明瞭であつた Lüders 綫の模様は漠然と稜地になつて行く。此の時 Lüders 綫の喰ひ込む境界はその點の應力の強さが、丁度降伏點になるやうな點の軌跡であらう。故に平行部の應力が降伏點より大きくなるに従ひ、その限界は擴がって肩の部に喰ひこんで行く。

この限界は切斷の後に於いては最大荷重を降伏點強度になるやうに擴げた斷面積をもつ筈であつて、その應力の計算は可塑變形であるから、是れに觸れることは避けておく。唯、最大荷重と降伏點とは常溫に於いては、1.8 : 1 位の比を保つが、Lüders 綫の最後の擴りの弧の張力に垂直な弦の長さと同様に 1.8 : 1 に近い比をもつてをる。

II. 靑脆溫度に於る抗張試験

1. 靑脆溫度に於る抗張試験

1) 装置 電氣加熱油槽で試片を所期溫度に保つて試験を行た。即ち第 7 圖に示すやうに試片 T に殆ど接觸した銅管 C を中央に通した油槽 B をつくり、油槽の外側より



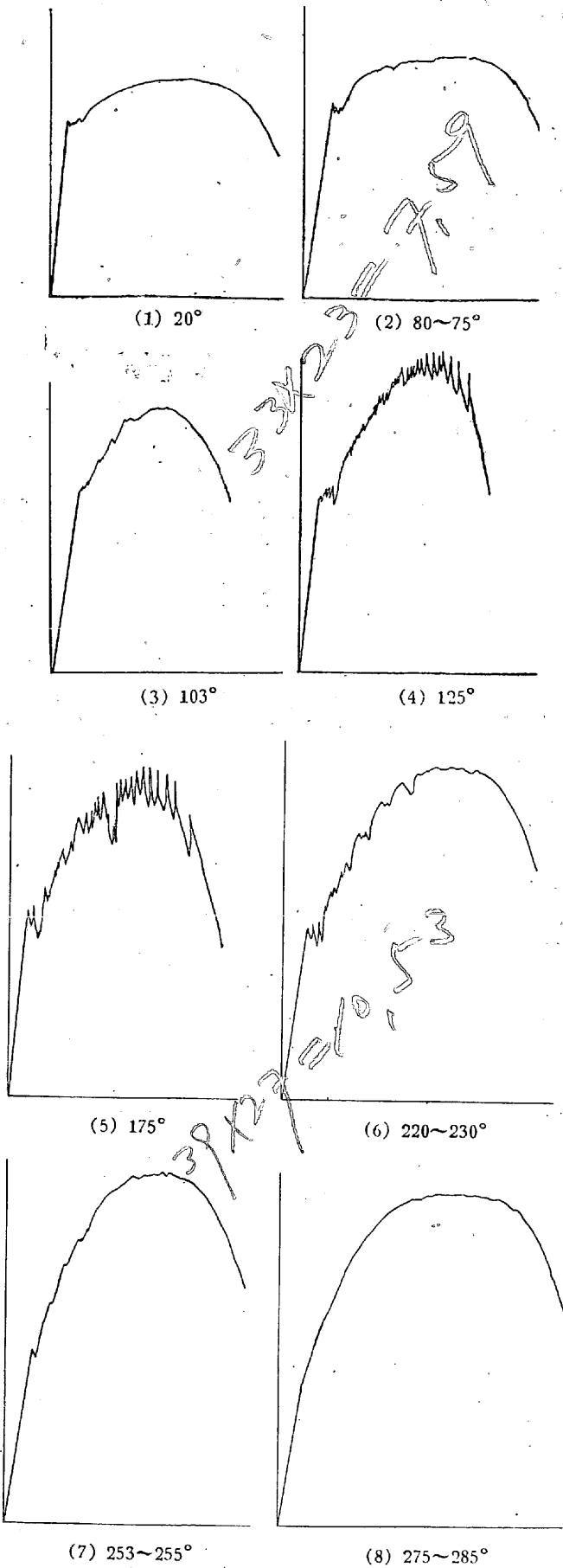
第 7 圖 加熱油槽 電熱線 R を以て油 O を熱して之によつて試片を均一に所期の溫度に保つた。此の加熱槽を試験機の掴みの間に置き、試験中もそのまま電流を通じておいた。試験機は Amsler 式 2 匙針金試験機を用ひて、1 mm/min の速度で試験し、荷重-伸曲線は附屬の自記装置によつて直接記録せしめた。

2) 結果 試験溫度は 20°, 75°, 100°, 125°, 175°, 225°, 275°, 300° の 8 階段で行ひ、第 8 圖 1)~(8) の如き結果を得た。

20° 試験では降伏點に踊場が出た後は最高荷重を超え、局部收縮を起し切斷に至るまで荷重-伸曲線は連続的な普通の柔軟金屬と同様な形を以て終始してをる。

75° にもなれば降伏點踊場も起伏の大きな不連続を示し、その後荷重にも所々に不連続が生じてをる。100°、

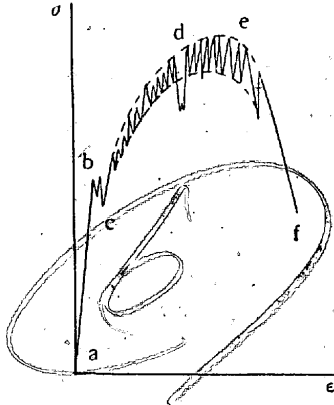
第 8 圖



125° と温度の上昇と共に不連続は多く且大きくなって 175° に於いて最大となり、それより段々減少して 280° に於ては殆ど消えて滑かな曲線になる。但此の時、最も注意すべきは、降伏点に踊場まで出なくなつてをることである。

此の荷重-伸曲線の不連続はその形から第9圖のやうに分類することが出来る。

第 9 圖 不連続の分類

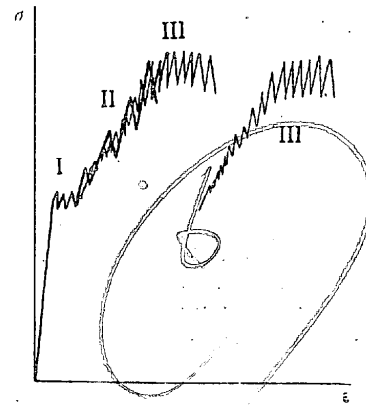


- 即ち I 比例部分 a-b
- II 第一不連続群 b-c
- III 第二不連続群 c-d
- IV 第三不連続群 d-e
- V 局部収縮 e-f

第一不連続群は降伏点踊場であつて、温度の上昇と共に不連続の起伏が大きくなって行く。

第二不連続群は第一不連続が終つてから荷重が漸騰する間に出るもので、Lüders 縞が不連続的に肩の部に入つてゆくと同時に生ずる。第二不連続群中には別種な小さな不連続が混じてゐる。此の小さな不連続は荷重と共に増し、最大荷重で最も激しくなるものであつて、之を第三不連続と名附ける。第二群、第三群は混じて現はれるが、始めの間は第二不連続群が著しく、その間に小さく第三不連続が現はれ始め、次第に大きくなるが、第二不連続は最大荷重に達するや、それ以後は現はれない。之を模式的に描けば第10圖のやうに考へられる。即、太線で Lüders 縞による不

第 10 圖



連続即ち第一群及第二群を現し、細線で第三不連続群を表はした。尙第三不連続群は傍に取り出して描いておいた。要するに青脆温度試験に於ける荷重-伸曲線の不連続は本質的には第一と第三群との2種とすることが出来る。

温度が 200°C を超え不連続群が減衰する時、第一、第二不連続群のが、第三不連続群より先に減衰し、踊場はつひに全くなくなる。即ち275°C では最大荷重に於いて第三不連続のみが僅かに残る。300°C を超えれば不連続群は全くなくなり、純銅などと同じやうな平滑な曲線になつてしまふ。

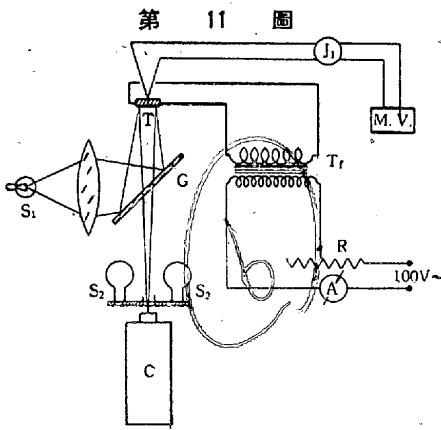
125° と温度の上昇と共に不連続は多く且大きくなって

2. 抗張試験中試片上に現れる變化の活動寫眞による研究

1) 装置 第1節の結果と Lüders 綫との關係を明かにするため抗張試験中、各溫度に於いて、それぞれの試片の表面に Lüders 綫を始め色々の變化を活動寫眞に撮影して研究した。

表面の變化を觀察しながら、高温抗張試験をするためには前節のやうな加熱油槽を用ひるわけに行かない。それで強電流を直接試片に通じて自己抵抗で加熱した。一寸均一加熱が出来難いやうであるが、試片の焼戻色から判断して充分の均一性のあることを發見した。

その具體的の装置は第 11 圖のやうな具合にした。即、試片 T を試験機から電氣的に絶縁して、之に強電流を變壓器 T_r から送て加熱した。その電流の強さは變壓器の一次線回路に可變抵抗器 R と電流計 A とを挿入して調節した。



溫度を測るためには試片の裏側に

電熱對 J_1 を半田付けにしてミリボルト計で讀んだ。

照明は前章のやうに透明硝子板 G によつて直接反射照明を行つたが、これだけでは餘り硬くなり過ぎるので、散光部を明るくするため、寫眞電球 S_2 を 4 個補助に點じた。反射照明の光源には點光源用白熱電球 (S_1) を用ひた。寫眞器は“Universal”活動寫眞機 C を用ひ、露出は撮影機の扇狀開閉器と Compur 開閉器とを併用した。

試験機は Amsler 2 鈺針金試験機に特に緩徐索引装置をつけて用ひ、測力計を試片と同時に撮影するために、上のつかみの本體に對する動きを圓形微尺計で讀んで荷重の大きさを知つた、その一目盛は 2.09 kg である。

2) 結果 第 12 圖から第 14 圖に示すやうである。その荷重-伸び曲線は第 8 圖と同様な形を示してをる。

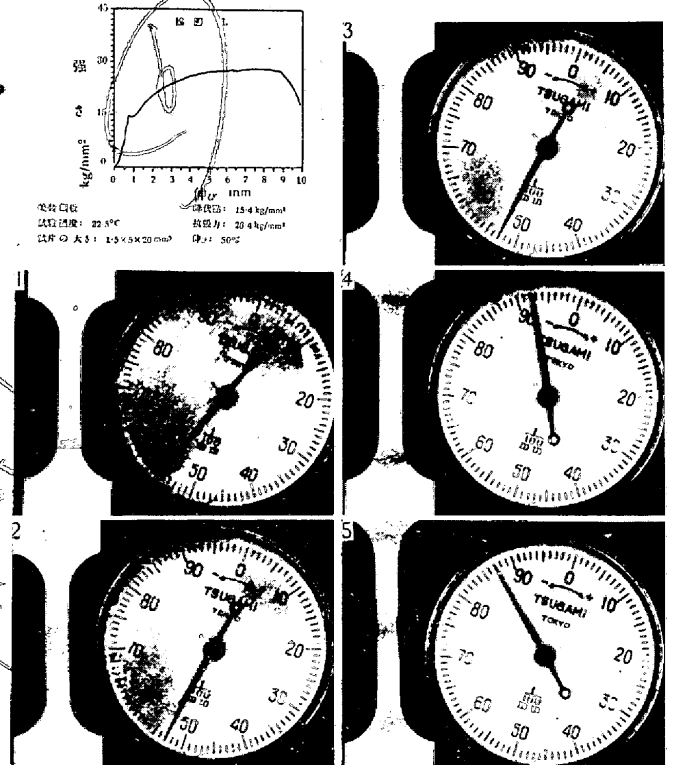
常溫では Lüders 綫も第 1 章の時と同様であるが、溫度の上昇と共に變化してゆく有様は第 13 圖以下に見られるであらう。

(イ) 22.5° に於ける抗張試験 (第 12 圖) Lüders 綫は第 12 圖の寫眞 1 より出始めて寫眞 3 までに平行部を覆

ひつづく。その間、測力計の指針は目盛 53 (111 kg) を示して停止して動かない。但、寫眞 1 では目盛 55 (115 kg) を指してゐるが、これは上部降伏點で、下部降伏點目盛 53 に落ちる前の瞬間である。

寫眞 1 より前は彈性變化中で、特に目立たない。寫眞 3 以上は Lüders 綫が平行部外に食み出して肩の部を犯してゆき、寫眞 4 では最大荷重に達し、Lüders 綫も喰ひこむ所まで喰ひこんでをる。それ以上は深くはいらず、寫眞 5 では局部收縮を始めてをる。寫眞 4 より、平行部の Lüders 綫はぼんやりとなつて、その跡は唯、梨地様の粗面となつてをるだけである。

第 12 圖

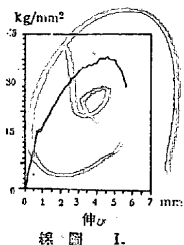


(ロ) 100° に於ける抗張試験 (第 13 圖) 寫眞 1 は彈性變形中なので、著しい變化はない。寫眞 1 及 2 の 2 回に幅廣き Lüders 綫が平行部を覆て寫眞 3 では指針の上昇を示してをる。線圖 I の荷重-伸曲線でも降伏點で二つの大きな不連続を示すだけで踊場は過ぎてをる。寫眞 3 から荷重も増してゆくが、寫眞 12 までには 22.5°C の場合と大して變たこともない。寫眞 4 以下では荷重は最大値に近づき、遂には局部收縮も示して來るが、その間に矢印で示したやうな斜めの綫が、Lüders 綫の跡の梨地面の上に現はれて來る。之は活動寫眞で見られるやうに、一度現はれた上に幾度も重て繰返し現はれる點が Lüders 綫とは全く異た性質を示す。此の綫と相對應して第三不連続群が發生

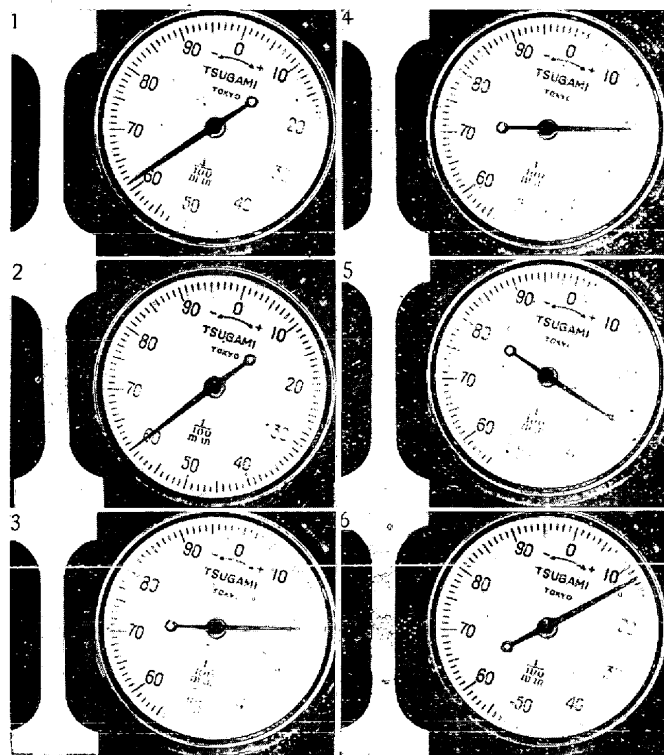
してをる。この縞を「迂り縞」と稱へることとする。顯微鏡的な結晶劈開面に生じるものを迂り線として區別することとする。

第 13 圖

寫眞は活動寫眞に依る研究の一例を示す。
寫眞番號は本文と關係なし。以下同様



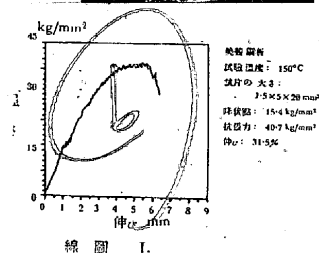
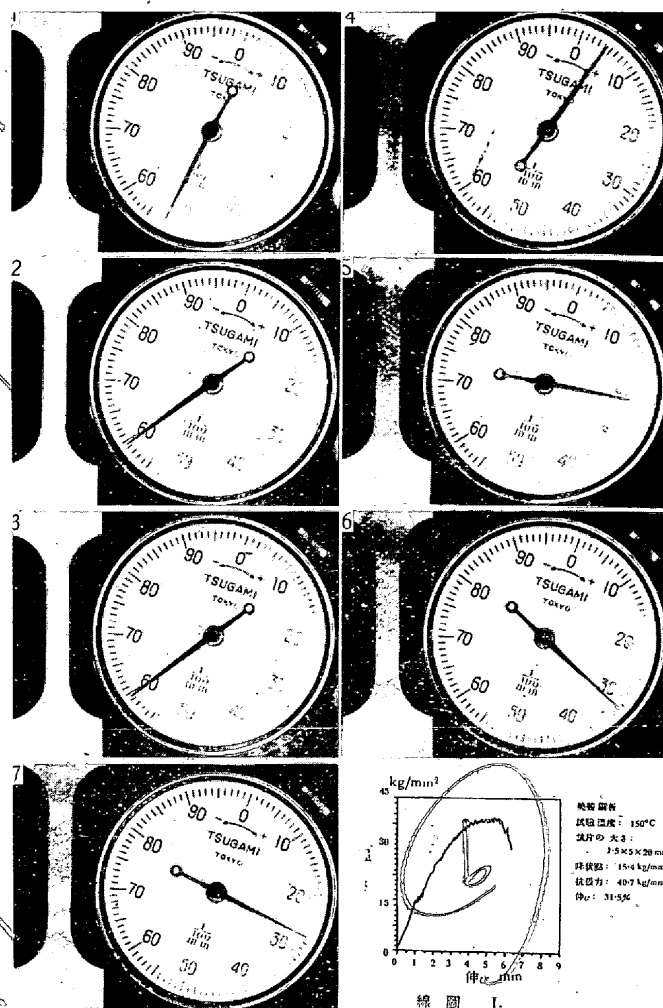
美裝鋼板
試験温度: 100°C
試片の大きさ: 1.5×5×20 mm³
降伏点: 16.5 kg/mm²
抗張力: 39.0 kg/mm²
伸び: 27.5%



迂り縞の交點の一つが遂に括れ出して、局部收縮を起し、そとより切斷に到るのである。

(ハ) 150°C に於ける抗張試験(第 14 圖) Lüders 縞の現れ始めた状態を寫眞 1 に示す。續いて寫眞 2 までの間に平行部を犯して行く。出始めの寫眞 1 では測力計は目盛 54 を示してゐるが、平行部の兩端に一度現はれた寫眞 2 では測力計の針は既に目盛 60 を指す。更に中央部に Lüders 縞が進んでゆくに従ひ、指針は目盛 57, 52, 63, 57 と盛に振動してをる。之は一度に出る Lüders 縞の幅が廣いためらしく、振動の上端の値が 54, 57, 63 と昇て行くのは、或は温度の不均一のためであらう。Lüders 縞が一つ現はれるたびに指針が落ちてをるのを示すことは活動寫眞を見ればよく判る。

第 14 圖



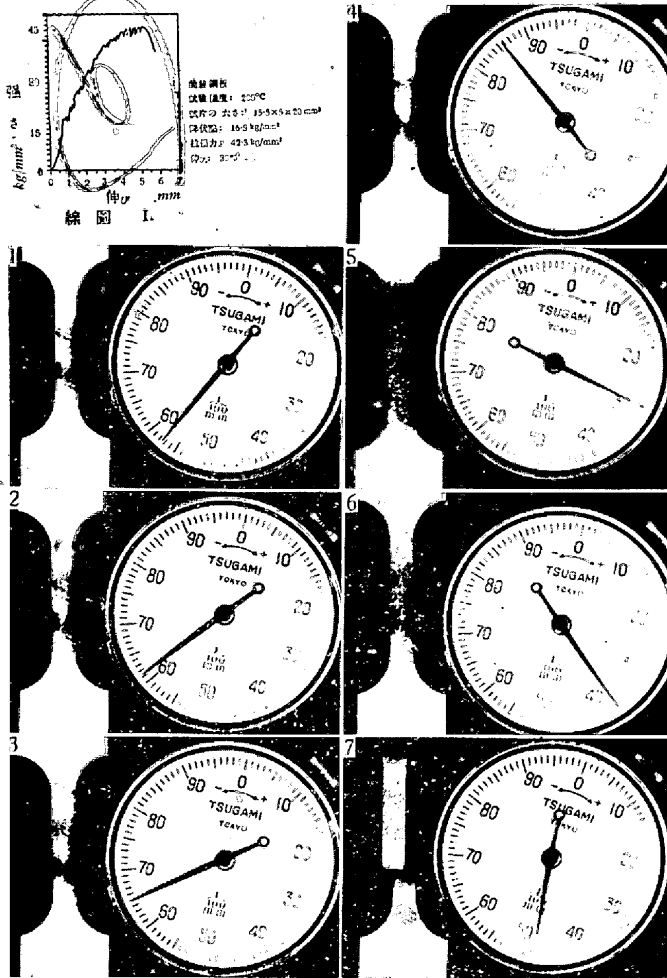
Lüders 縞が平行部を覆ひ、降伏点踊場が終ると、荷重が増して Lüders 縞が肩の部に喰ひこんでゆくことは他の場合の通りであるが、迂り縞が現はれ一度出ては直にぼんやりとなり、又その上に新しく現はれ、再三、重つて生じて行く有様は寫眞 14~22 でも想像がつくであらうが(ロ)と同じく活動寫眞がよく示してをる。

(ニ) 200°C に於ける抗張試験(第 15 圖) 前の場合と同様であるが、不連続が大きく且、迂り縞が一層明瞭になつてをる。上部降伏点は寫眞 1 に示すやうに測力計の指針が目盛 59 を指して、Lüders 縞も始めて發生してをる。Lüders 縞發生のため指針は落ちて目盛 56 を指す。續いて第 2 の Lüders 縞が發生する時には寫眞 2 のやうに目盛 59 にまで昇るが、寫眞 3 のやうに Lüders 縞が出てしまふと目盛 54 に落ちる。こゝで Lüders 縞は平行部を覆ひ、降伏点踊場に相當する第一不連続群は終り、Lüders 縞は肩の部に不連続的に喰ひこんでゆくと共に、荷重も不的に上昇する。Lüders 縞の成長と荷重の不連続は一致連續して進んでをるが、その現象も寫眞 4 で終つて此の前後

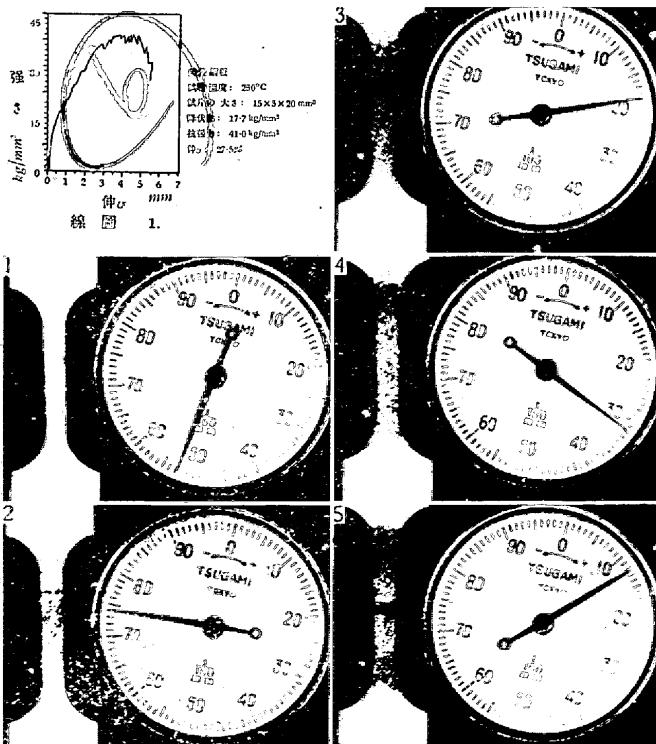
から迂り縞と第三不連続群が発生し出す。

即ち寫眞6から迂り縞も明かに見得るやうになり、第三

第 15 圖



第 16 圖



不連続も續發して行く。但、焼戻色が試片の表面に生じてゆくために、寫眞は少々不鮮明になってゆく。しかし實物では迂り縞の發生は甚だ激しくなつてをる。

(ホ) 250° に於ける抗張試験(第 16 圖) 此の場合に Lüders 縞は寫眞 3 一つで平行部を覆てをる。同時に荷重-伸曲線でも、第一不連続群に相當するものは唯一つの不連続よりない。最大荷重(測力計の目盛で 130)に達して第三不連続群は發生し、迂り縞も寫眞 41 に示すやうに、此の間に盛に現はれてをる。此の時の曲線は線圖 1 のものとよく一致し、この不連続現象の偶然でないことを示してをる。

此の温度になると荷重-伸曲線の不連続も小さくなると同時に Lüders 縞及迂り縞もぼんやりとなつてゆく。

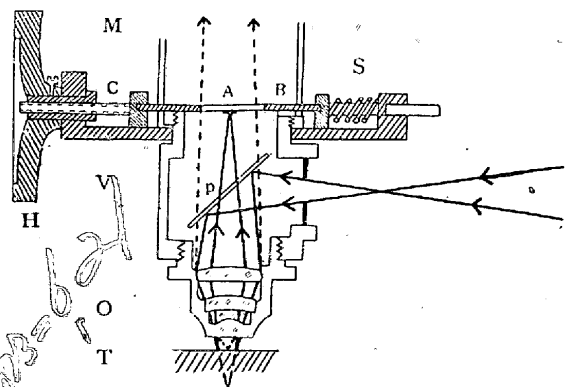
III. 變形に伴ふ組織の變化

1. 装置

1) 反射顯微鏡の遮光照明 極めて初期の塑性變形による迂り線等の變化は普通の正反射照明による金屬顯微鏡では發見し難く、又暗視野照明による反射顯微鏡にも出て來ない。そこで空氣の運動等を撮影する遮光照明*を金屬顯微鏡に應用して見た。

即ち第 17 圖に示すやうな装置を施した。上圖は縦斷面圖であるが、斜線の入れてあるものが、遮光照明のために取付けた装置で、斜線のない細線で描いた部分は普通の平

第 17 圖



—— 直射光 光路
- - - 散乱光 光路

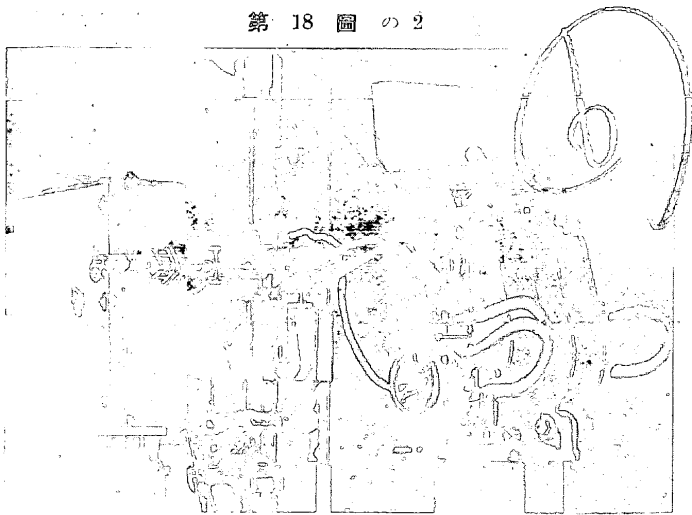
* Sbr

面硝子式垂直照明器を取付けた金属顕微鏡の對物鏡の近くの圖である。即ち T は試料, V は垂直照明器, O は對物鏡, M は顕微鏡鏡筒である。鏡筒の下端に細窓をあけ、之に丸い窓をもった板 AB を挿入する。照明の光學系統を少し變更して、光源からの光が反射用平面硝子 P, 對物鏡 O を通り、試料 T で反射されて再び對物鏡を通して出て来た時に光源の像が板 B の平面上に結ぶやうにする。板 B の窓の中央に蔽障 A を取付け、その上に光源の像を結ばしめ、光源よりの直接光を鏡筒の方へ行かないやうに遮

第 18 圖 の 1



第 18 圖 の 2



ぎる。蔽障 A の位置を細かく調節するために微動ネジ C 及びバネ S, 把子 H を装置する。

かくすると光源からの直射光は接眼鏡に入らず、直射光から極めて僅かの角度だけそれて散亂された光だけが蔽障の周囲を通して接眼鏡に結像する。故に平面であつた試料の表面に極めて僅かな變化があればその變化による光の散亂だけを接眼鏡によつて觀察することが出来るであらう。故に普通の金属顕微鏡では正反射の光が強いために、か

る僅かの散亂は認められず、Ultropak の如き暗視野反射法では極めて大なる角の散亂光だけより見られず、かゝる僅かの角の散亂光は正反射光と共に對物鏡外にそれて了ふから見られない。よつて後に示すやうに此の兩者によつてはどうしても認められない僅かな表面變化を觀察するには此の方法によるより外は致し方ないのである。

2) 抗張試験中の組織變化撮影装置 試験機の支柱に顕微鏡を取付けて、抗張試験中刻々の變化を撮影するやうにした。その装置の寫眞を第 18 圖寫眞 1 に示す。即ち試料 T の前に顕微鏡 M を取付け、之に C. Zeiss の可視顕微鏡寫眞機 Phoku P を接続した。照明は特殊白熱電球を具へた照明装置 I と Chateriler 型プリズム垂直照明器 V とを組合せて用ひた。伸びは Amsler 型自記測伸計を用ひて荷重—伸曲線を直接に記録せしめて、それから測つた。

試片全体の移動による視野の移動を防ぐために微動装置を装置した。第 18 圖寫眞 2 に示すやうに、この微動装置は試験機に固定し、鏡基を滑臺に取付けた。

撮影に際しては Phoku の視野接眼鏡より覗いて焦點と視野とを調節して後露出する。Phoku の代りに可視接手を用ひ、その後に活動寫眞機 A を置けば、組織の變化の活動寫眞も撮影出来る*。試験を熱するには低壓變壓器による強電流を用ひた。

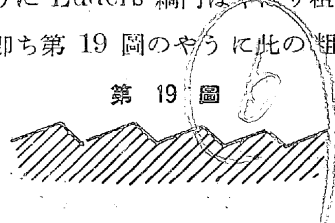
2. Lüders 綫中の組織の變化

1) Lüders 綫(第 20 圖) 降伏点踊場の發生と共に肉眼的には既述のやうに明瞭に現はれた Lüders 綫を擴大して觀察してゐる。

(イ) 10 倍に擴大すると肉眼で直接見るよりも明瞭になる位で、寫眞 1 及 2 にその一例を示す。此の二つの寫眞は斜照明で撮影し、その照明方向を變へたものであつて試料の同じ部分を撮影したものである。かく照明方向によつて明暗を變へて見えるといふことは、Lüders 綫内の表面がそれぞれ特有な方向を有して、入射光線の反射方向を異にするため綫模様が見えるのであつて、必ずしもその面積内が粗面となつた爲とは限らない。

(ロ) 50 倍に擴大して撮影したものは寫眞 3 に示すやうに Lüders 綫内はやはり粗面となつてをることを示す。即ち第 19 圖のやうに此の粗面をなす各單位がその表面

第 19 圖



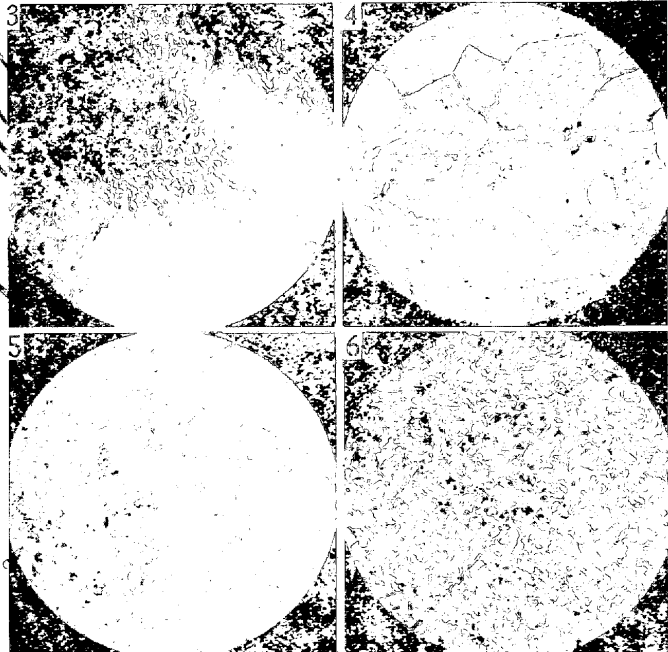
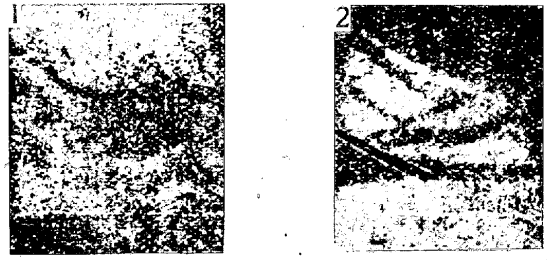
を平行にして一定方向に光を反射してをると考へた方が尤もらしいやうで

あるが、確定的實證は擧げられない。唯粗面となつた爲、光の散亂を生じそのために反射率を減じたのが、Lüders 縞の見得る原因の全部ではない。

(ハ) 1,000 倍に擴大して見ると、寫眞 4 のやうにその組織には何の變化も認められない。之は粗面になつた單位一つ一つを見てゐるためか、あの明瞭な Lübers 縞の境も 1,000 倍の視野では決して認められない。實に興味のある問題である。

(ニ) 150 倍に擴大したものでも寫眞 5 に見るやうに

第 20 圖



B 37x27=999

何の變化も認められない。但し焦點を狂はしてみると、寫眞 6 のやうに光る網目が漠然と見られる。此の點は更に精密な研究を要する問題で、次に説明するであらう。

2) 遮光照明による觀察(第 21 圖) 結晶を稍大きく成長せしめて試験すると、踊場は不明瞭になつて來ると共に迂り線が極めて初期から見られるやうになつて來る。然し之も擴大して見ると見えない。

第 21 圖は何れも同一場所の迂り線のあるべき部分を擴大して撮影したものである。寫眞 1 は金屬用垂直照明器で、寫眞 2 は暗視野反射照明器(Ultropak を用ひた)で、何れも 11 倍 apochromat 對物鏡を用ひて 100 倍に撮

第 21 圖 (續き)

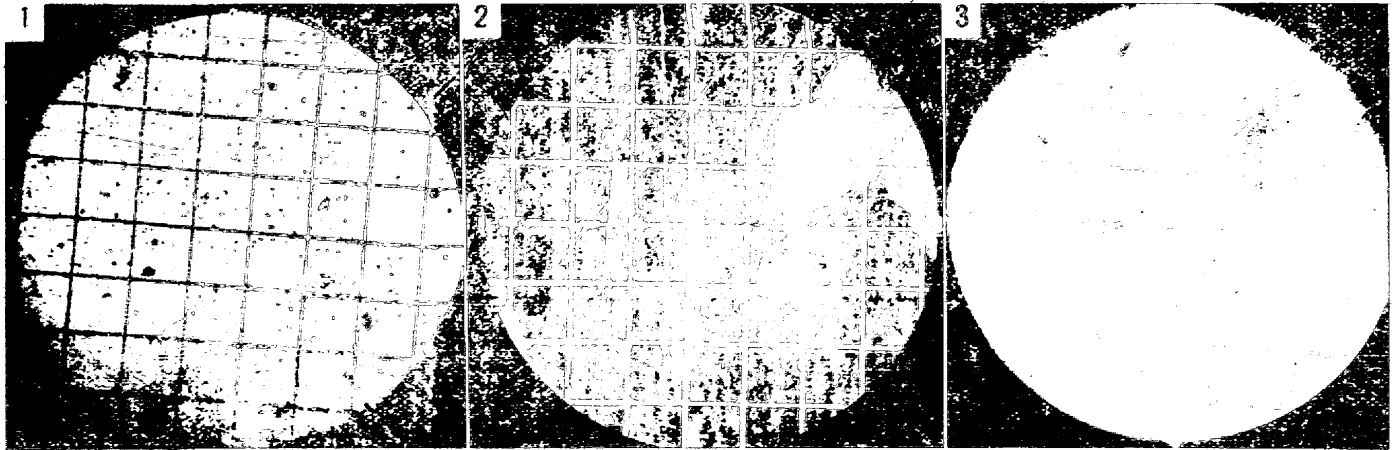


影したものであるが、變形の影響は何れも認められない。然るに遮光照明すると寫眞 3 のやうに迂り線を結晶粒中に明かに見得る。寫眞 4, 5 は順々にその隣の部分の迂り線を示す。かく普通の照明法によつて發見し得なくとも迂り線は存在するものであるから、Lüders 縞中の結晶粒中にも迂り線がないとは斷言出來ない。

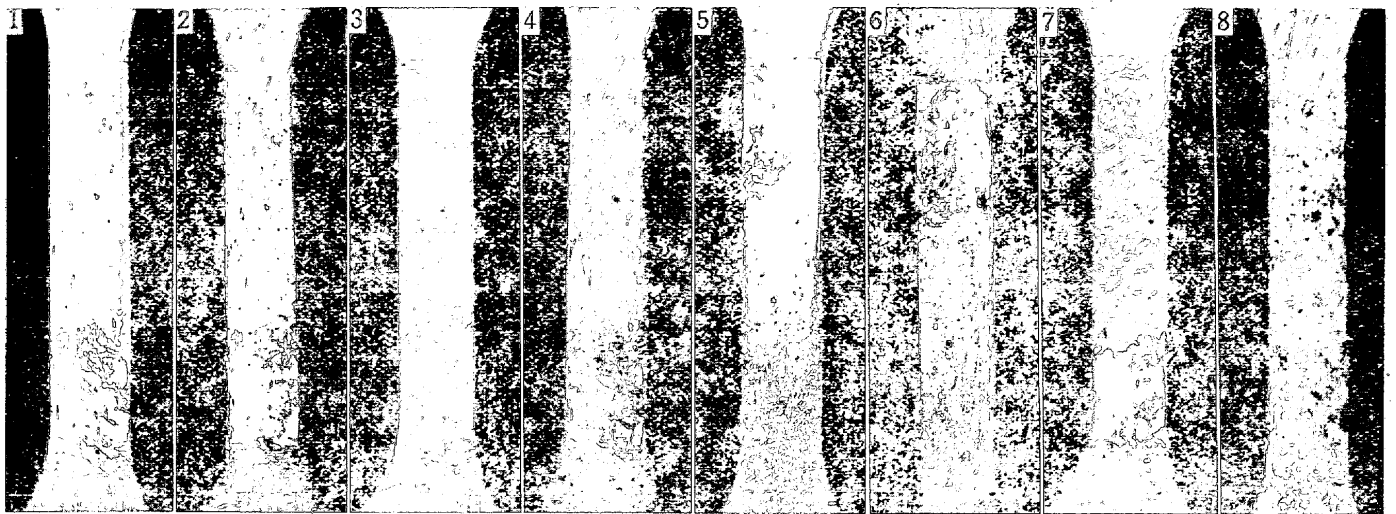
3) Lüders 縞中の變位(第 22 圖) 後に示すやうに Lüders 縞なり踊場なりは結晶が大きい時には發生しない。細かい結晶粒組織に於てのみ觀察し得るのである。即ち結晶粒の直径は 0.1mm 以上では降伏點現象は現はれな

第 21 圖

57x18=1026



第 22 圖



いから、降伏点の伸びを 0.5% としても、その直径は最大 0.0005mm より變形しないであらう。此の大きさの變形を顯微鏡により測定することは不可能である。即ち降伏点に於ける結晶粒の變位は定量的に測定出来ないのである。實際、試料に 0.1mm の格子を切り、0.001mm 讀める管の C. Zeiss 製, Adam Hilger 製, 理研製等の移動測微尺計で測定して見たが、系統的の結果は得られなかつた。

その時の試料の表面には第 22 圖に示すやうに、著しい變化は現はれてゐるが、普通の顯微鏡では辻り線さへ發見し得ない。

寫眞 1~8 に Lüders 縞の變化を示さず、結晶粒が大きい爲、Lüders 縞といふより、個々の結晶粒の辻り線で變形してゐると見られるやうな状態である。その荷重の極く低いところから、辻り線は出始めてゐる。即ち寫眞に示した變形状態と應力との關係は第 1 表のやうである。

第 1 表

寫眞番號	1	2	3	4	5	6	7	8
應力(kg/mm ²)	2.0	2.0	2.0	2.4	3.4	4.1	8.5	46.3

降伏点踊場は出て來ない。

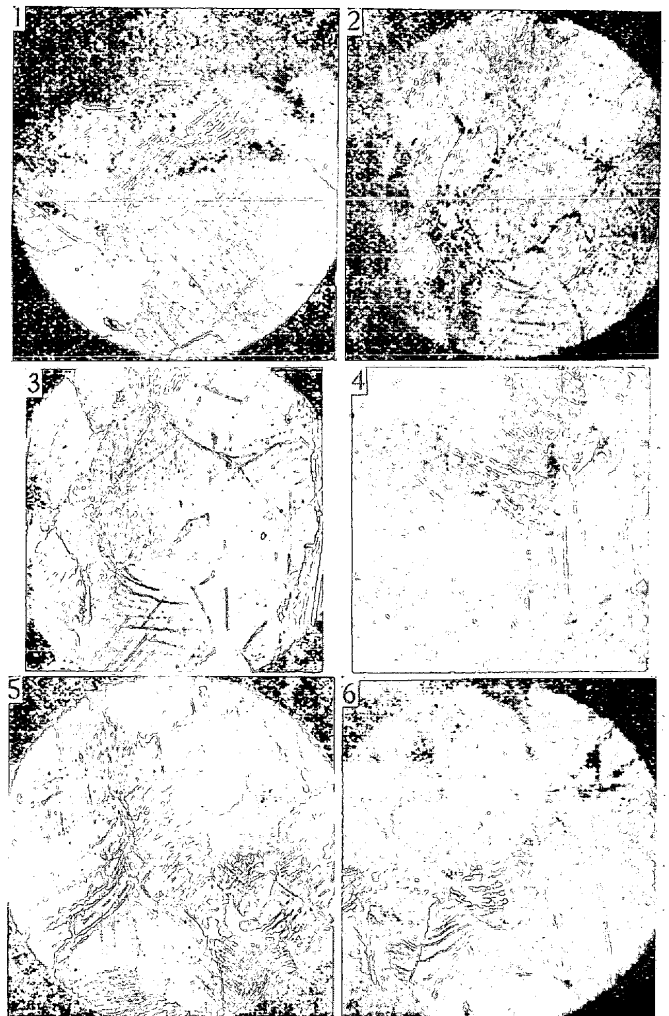
此の寫眞は 2 倍の擴大であつて、辻り線も見えてゐるが、300 倍に擴大して垂直照明器で照明して見ると、辻り線は見えず、遮光照明だけで見得る。倍率を 80 倍に下げても垂直照明でも暗視野照明でも辻り線は見えないが、遮光照明だと見得るのである。

かく初期の辻り線が從來顯微鏡で觀察出來なかつたのは、照明法が悪かつた爲である。然し、Lüders 縞が明瞭に現はれるやうな細結晶組織では、Lüders 縞中の辻り線は遮光照明でも充分な觀察は困難であり、後に示すやうに、

降伏点變形は結晶粒が單位とならないから、大きな辻り線は出ないと考へられる。

3. 降伏点後の塑性變形(第 23 圖) 降伏点に於ける結晶粒中の變位は充分に測定や觀察が出來ない。その後、變形が進むにつれ次第に色々の現象が觀察出來るやうになつて來る。

第 23 圖



828.26 = 10,92

第 23 圖寫眞 1 は應力 22 kg/mm^2 で踊場が終了直後の組織を垂直照明器による斜照明で撮影したもので緩い起伏と「迂り線」のやうなものが現はれてゆく。

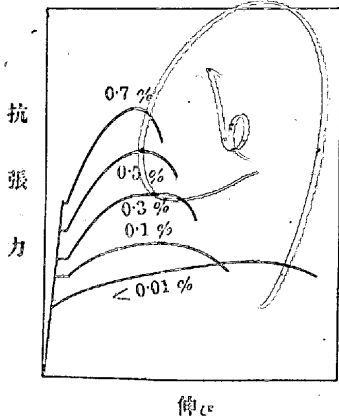
荷重を増して 25 kg/mm^2 に到れば寫眞 2 のやうに「迂り線」が發達してゆく。

27 kg/mm^2 に到れば「迂り線」が寫眞 3 のやうに更に明かになる。同じ應力に於ける他の場所を寫眞 4 に示すが、此の部は後に局部收縮を越して寫眞 5 及 6 のやうに變形してをる。寫眞 5 及 6 は同一場所を唯焦點だけを變へて撮影したものである。局部收縮を起すとかくも變形が甚だしくなつて來るのである。

この塑性變形は活動寫眞に撮影して觀察に便ならしめた。「迂り線」として云つた線の本質に就ては、後に改めて説明する。

4. 變形に及ぼすパーライトの影響 焼鈍炭素鋼の炭素

第 24 圖



含有量が増すにつれ、降伏點現象は弱つて、強さは増してゆくことは古來よく知られてゐる。第 24 圖にその一例を示す。此の原因がパーライトにあることは誰しも想像はしてゐるが、實際如何にして影響されてゐるかは餘り研究されてゐない。

第 2 表のやうな鋼によつてその變形と組織との關係を研究してみた。しかし降伏點踊場中の變形の影響は充分に觀察し得なかつた。

第 2 表 炭素鋼の組成

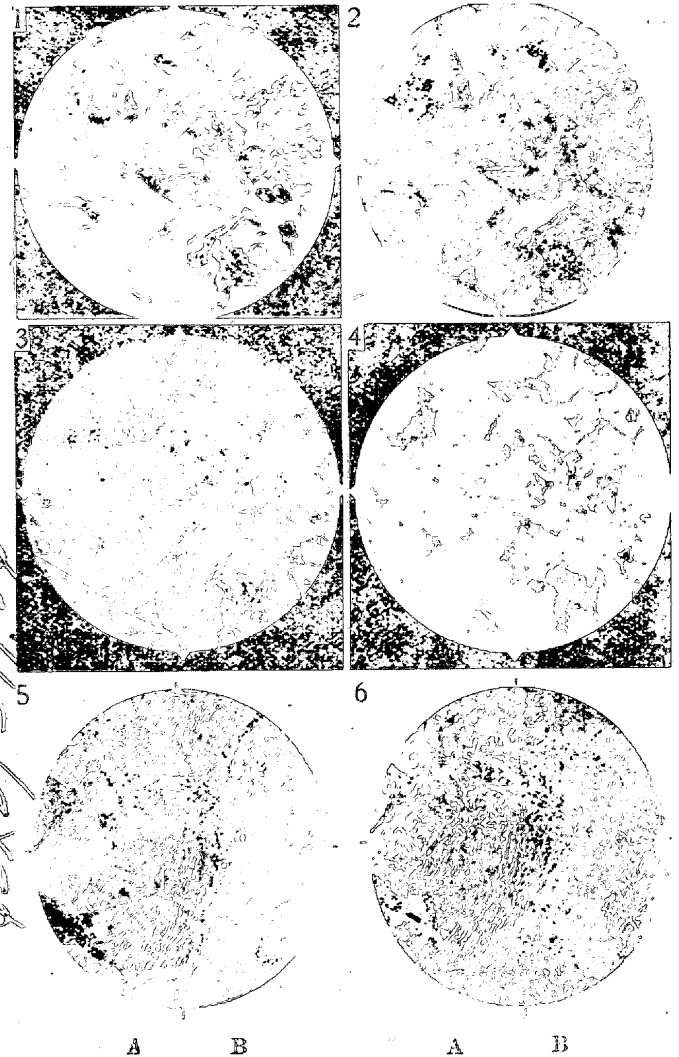
合符	組 成 (%)				
	C	Si	Mn	P	S
1	0.035	0.38	tr	0.021	0.021
3	0.30	0.41	<math>< 0.27</math>	0.029	0.020
5	0.48	0.21	0.27	0.029	0.023
7	0.70	0.19	0.34	0.028	0.016

1) C 0.3% 炭素鋼(第 25 圖) 寫眞 1~4 は降伏點を超えた時の同一場所を、唯、焦點だけを變へて撮影したものである。焦點の合はない時は寫眞 1 のやうに網狀に光た組織が見えるが、段々焦點を合せてゆくと、寫眞 2, 3 と前に見えた網狀組織は見え難くなつて行く。同時に、此の網狀組織は結晶粒境界とは關係のないことがわかる。寫眞 4 になると、寫眞 3, 2, 1 と逆に見ないと網狀組織の出た場所はわからなくなつてゐるが、唯網狀組織の見え

る跡には「迂り線」のやうなものが集てゐることを知る。

更に荷重を増して最大荷重近くへゆくと、寫眞 5 及 6 のやうに明瞭になる。即ち寫眞 5 は面積 A に、寫眞 6 は面積 B に焦點したもので、その境 caf には「迂り線」が數本現はれてをる。つまり同一場所を唯焦點を合す點を變へて撮影したもので、一つの境界線 caf を境に兩側の面積 A 及 B は高さを變へてをることがわかる。

第 25 圖

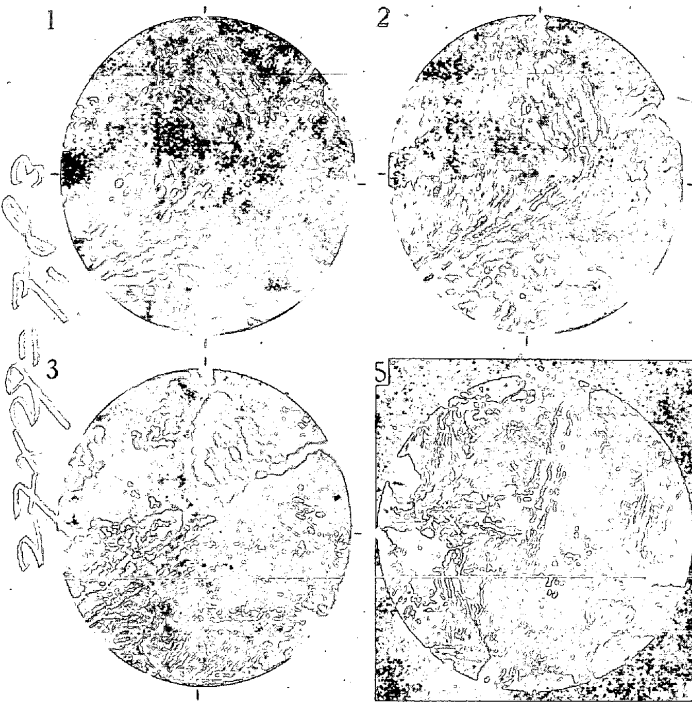


恰度、地殻運動に於て二つの地塊が一つの裂縫帯を境に互變位してをると同様なことが多結晶群中に起てをると見られる。即ち個々の結晶群とは獨立に幾つかの結晶群を一塊として運動し、その一塊の結晶は他の結晶群と數本の斷層のやうな「迂り線」よりなる一つの境界帯を以て互に變位してゐる。前より「迂り線」として呼んでゐた變位の境の線は、後に述べるやうに劈開面の眞の迂り線とは認められないで塑性的のひび、即ち裂縫帯にすぎないと思はれる。よつて此の變位の境の裂縫帯よりなる境界帯を裂縫帯と呼ぶ。即ち上に用ひた「迂り線」は眞の迂り線ではなく、

塑性裂罅に過ぎず、結晶群は裂罅帯をもって互に變位してをるのである。更に荷重を増せば愈明瞭となる。最大荷重近くに於て前と同様に焦點を變へて撮影したものを寫眞5~6に示す。倍率を小さくしたので變形の單位である結晶群が數個見え、裂罅帯の白い網状組織が明かに見える。

2) C 0.5% 炭素鋼(第 26 圖) 0.5% ほど炭素が増し、パーライトの面積が擴ると、上述の裂罅の意味が明瞭となる。寫眞 1~3 は同一場所を三段に焦點を合せて撮影したもので、左上方にあるパーライト P の周りをパーライトを避けて曲てゐる裂罅帯を見るであらう。左上と右

第 26 圖



も見られる。パーライトを廻て裂罅帯がうねって通り之境に三つの結晶群が隆起、陥没してをる。

寫眞 5 に於ては、裂罅帯以外に平行な直線的迂り線が存在する。しかも一つの結晶内に止て、隣の結晶中にまで貫入してをらない。之こそ眞の劈開面に於ける迂り線と考へられる。曲りくねってをる裂罅帯と見られるものは、いづれも數個の結晶粒を連続的に貫いてをる。かゝることは劈開的迂り線としては想像出來ないことである。

3) C 0.7% 炭素鋼(第 27 圖) 抗張試験の各段階に於ける表面状態の變化とその時の顯微鏡組織とを對應して示す。寫眞 1 は降伏点踊場に入った時の Lüders 縞が一部に出た時の状況であつて、應力は 30.6 kg/mm² であるが、組織には殆ど變化なく、寫眞 3 に於て遮光照明により僅かに、裂罅らしいものを發見し得る。

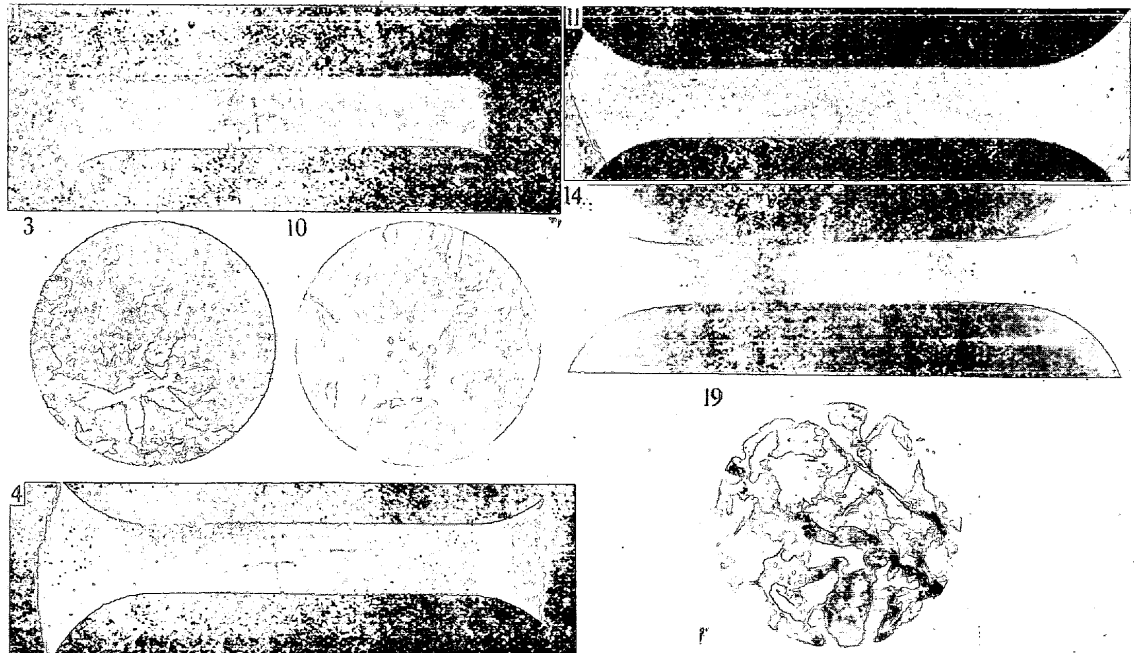
寫眞 4 は踊場の終つた瞬間のものでも、Lüders 縞は平行部を覆ひ盡し、地鐵の所々に裂罅が見える。

寫眞 10 は應力 40 kg/mm² に達した時の状況で Lüders 縞の跡はかなり梨地化し、Lüders 縞の縁邊は肩の部に深く喰込んでをる。裂罅帯はかなり發達し、パーライトの間を縫て進んでをる。

寫眞 11 は最大荷重 45.6 kg/mm² に達した時で、數個の結晶粒が裂罅帯で別れて相互運動を始めてゐることがよく判つて來る。ピントを變へてみると此の運動により隣同志の結晶群が相互に變位してをることが知られる。

寫眞 14 は荷重が最大値を超えて少し局部收縮を始めた

第 27 圖



下との二つの群は此の裂罅帯を境に上下に變位してをる。かく激しく曲ることは劈開面である迂り線がなし得るものであらうか。之は均質的な塑性裂罅と考へ、此の裂罅を生じるため、極めて局部的な迂り線が別に存在すると考へた方が自然らしく考へられる。同様な例は寫眞 4 に

46x27=1282 B

時で、此頃になるとパーライトがあつても纖維組織をなし
てをるのを認められる。

寫眞 19 は切斷後、局部收縮をなしてをる部分の組織を
見たもので、同一場所を擴大率及焦點を變へて撮影すると
中央の面積が、周圍に對して如何に浮き上てゐるかを判
る。此面積は數個の地鐵及びパーライト結晶を含んでゐ
て、此の群が一つとなつて變形要素をなしてゐることは明
かである。

IV. 熱處理の降伏點現象に及ぼす影響

1. 焼入効果 降伏點現象の最も著しい極軟鋼を焼入れた
場合、降伏點現象の變化をみて見る。

試料は美裝銅板を焼鈍して正常化せるもので、試片の形
は第 1 章のものと同形、厚さ 1mm のものを用ひた。

第 3 表

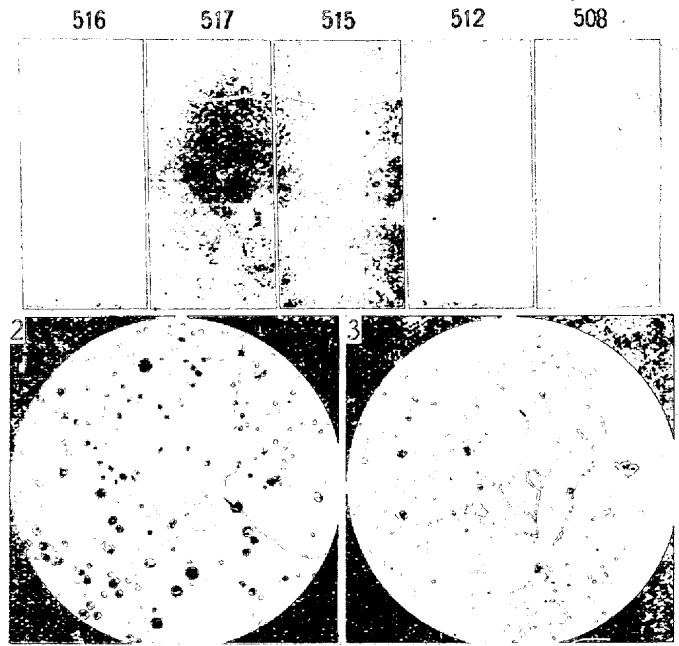
試片 番號	焼 入			焼 戻		力學的性質		
	溫度 (°C)	時間 (min)	冷却劑	溫度 (°C)	時間 (min)	降伏點 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸び (%)
517	1,100	120	寒劑 [*] -25°	—	—	48.4	64.8	34
515	1,000	60	水	18	—	52.7	70.7	23
516	"	"	"	"	—	47.0	62.5	29
511	"	120	"	"	160 60	43.3	51.4	34
512	"	"	"	"	220 "	37.5	46.2	41
513	"	"	"	"	290 "	34.0	43.8	35
508	"	"	爐中冷却	—	—	26.3	41.2	48

焼入するには焼鈍と同様真空電爐を用ひ、第 3 表の如く
加熱焼入した。焼入程度を變へるために焼戻條件を表のや
うに變へた。

焼入の影響は、結晶格子及び炭化鐵の組織の問題であ
る。焼入により γ-鐵が残ることはかゝる低炭素鋼では殆
ど問題になくてよいが X-線寫眞を念のため撮影してみ
た。第 29 圖上端の寫眞に示すやうに悉く同様な α-鐵の
組織を示してをる。焼入のために残るべき内力に就ては
X-線寫眞の技術の精度以下で茲では問題とすることが出
來ない。その中 1,100°C, 120min 加熱、寒劑焼入の No.
517 及 1,000°C, 120min 加熱、爐冷の No. 508 は結晶
粒が稍粗大となつてをることを示してゐる。

顯微鏡組織は第 28 圖寫眞 2~5 に示す。かゝる極軟鋼
に於ては、パーライトが出ないから、焼入も著しい組織上
の變化を示さず、唯境界炭化鐵が影響を受けてをるばか
りである。寫眞 2 及 4 は No. 508 の焼鈍試片の境界炭
化鐵を示してゐるが、地鐵の境界をべつとりと連続的に包
んでゐるやうに見える。寫眞 3 及 5 の No. 515 の境界
線はとぎれとぎれになつてをるやうに見える。即ち焼入に

第 28 圖



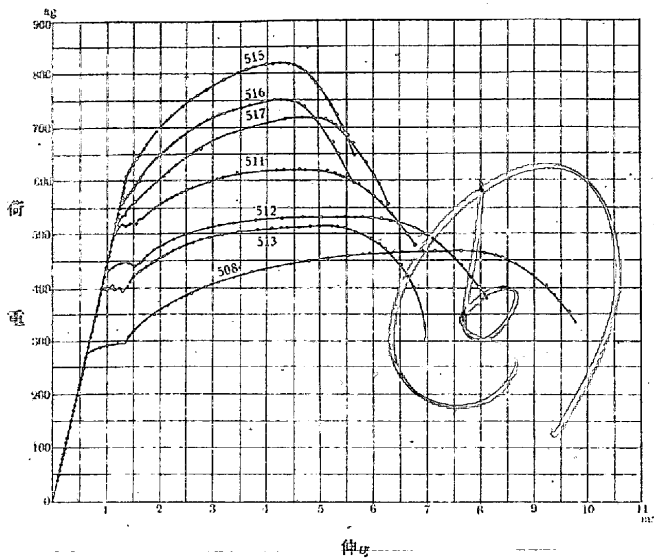
3
1 = 508



よつてオーステナイト組織を保たうとする炭化鐵が、保た
れ切れずに析出される時、結晶境界に擴る暇もなく、きれ
ぎれに結晶粒の周圍に析出せられたやうに見える。之は球
狀パーライトが存在することを思へば當然であらう。焼入
状態ではかゝる斷片狀炭化鐵として結晶境界に析出され
たものも焼戻によつて過飽和の炭化鐵が結晶粒界に徐々に析
出されて此の斷片狀炭化鐵をつないでゆくことは想像する
に不合理でない。顯微鏡では見えなくともそれが結晶粒界
に一面に薄膜として析出されてゆき焼鈍状態では連続的の
薄膜として結晶粒を包んでしまふやうになるであらう。

かゝる組織を有する試片の抗張試験の結果を第 28 圖
に示す。試験の際、試片面上に現はれた Lüders 綫の寫
生を第 30 圖寫生 1~5 に示す。その横に記した數字は伸
びを耗で表したものである。第 29 圖に見るやうに、焼入
た試片には降伏點に歸場が全く現はれない。これを焼戻す
ると焼戻溫度が段々高くなるにつれ、試片 511, 512,
513 と歸場も大きくなつてゆく。そして連続的に焼戻状態
即ち試片 508 に近づいてゆく。

第 29 圖 軟鋼の擴張性質に及ぼす焼入の影響



一方 Lüders 縞も焼入状態では甚だ貧弱で、Lüders 縞といふ程度ではなく、銅などに塑性變形が起ると表面が曇てゆく場合に近い、即ち加藤興五郎氏の銅の歪模様⁴⁾に似たもので、Lüders 縞の Fry 氏の歪模様などと全く遠ざかつてをる。焼戻によって踊場が恢復されると同時に、Lüders 縞も次第に明瞭となって、普通の Lüders 縞のやうになってゆく。つまり焼入によって踊場と Lüders 縞とは破壊され、焼戻によって徐々に恢復されてゆくのである。

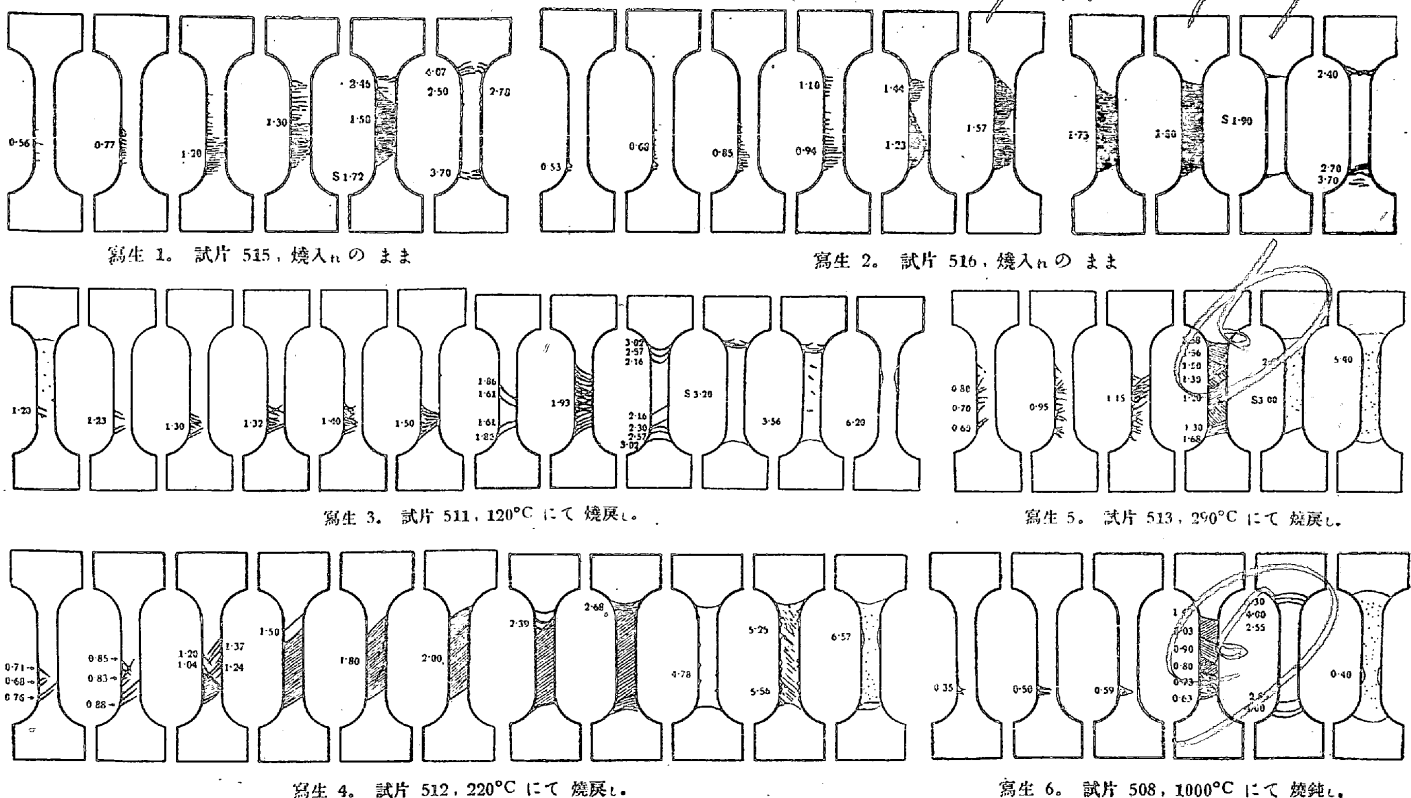
即ち第 29 圖の寫生に就て具體的に説明すれば、寫生 1 は最もよく焼きの入った試片 515 であるが、Lüders 縞とは云へないやうな極めて細い毛のやうな線が入ってゆく。引張荷重の不完全のため、曲げモーメントが加り一方より歪模様は入っていった。伸び 0.56mm より既に一方の側に毛のやうな線が入り、伸び 1.30mm まで少しづつ増してゆくが、伸び 1.42mm 、即ち降伏點 610kg (527kg/mm^2) で急に大きく成長し、伸び 1.58mm で平行部を覆ひつくしてゐる。その境は漠然たるもので、焼鈍状態の Lüders 縞とは甚だ似てをらないものである。

試片 516 も同様であるが、焼きの入り方が少し弱かつたせいか、Lüders 縞は少しはつきりして來た。伸び 1.23mm で濃く出て、伸び 1.80mm 位で平行部を覆ひつくすが、此の點は荷重 565kg (應力 47.0kg/mm^2) の降伏點にあたる。Lüders 縞は少しはつきりしたとはいへ甚だ漠然としたものである。

焼戻してゆくと、 $160^\circ 1\text{h}$ の加熱でさへ寫生 3 のやうに Lüders 縞も斷然明瞭となつてをる。曲げモーメントのため、早くより小さいものは現はれたが、降伏點 520kg (43.3kg/mm^2) に相當する伸び 1.50mm の點で平行部の全幅を通す明瞭な Lüders 縞を生じ、伸び 1.93mm までの踊場に相當する間に Lüders 縞も平行部を覆ひつくす。

第 30 圖

57 x 11 = 627



寫生 1. 試片 515, 焼入のまま

寫生 2. 試片 516, 焼入のまま

寫生 3. 試片 511, 120°C にて焼戻し。

寫生 5. 試片 513, 290°C にて焼戻し。

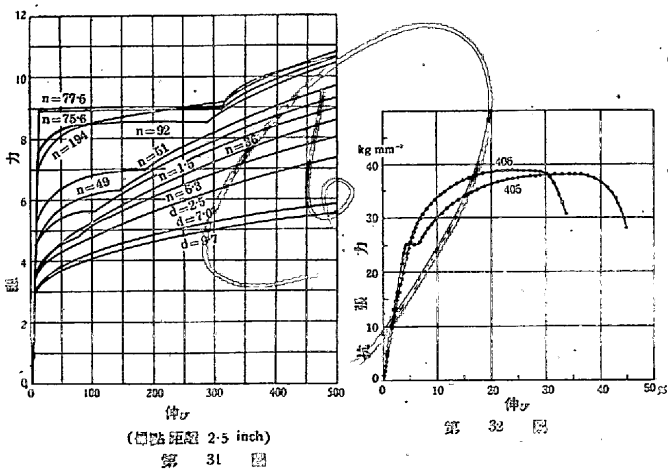
寫生 4. 試片 512, 220°C にて焼戻し。

寫生 6. 試片 508, 1000°C にて焼鈍し。

焼戻温度を 220°C に上げると第 13 圖のやうに踊場も明瞭になるが、Lüders 縞も寫生 4 のやうに、明瞭に降伏點 447 kg (37.5 kg/mm²) 伸び 1.37 mm で平行部の全幅を覆ひ、伸び 1.80 mm までの踊場に於て平行部全體を覆ひきつてをる。その覆つてゆく有様は劇然として焼鈍状態に甚だ近い。更に 290°C に焼戻温度をあげると寫生 5、試片 513 のやうに降伏點 400 kg (34.0 kg/mm²) で伸び 1.15 mm から 1.60 mm までの明かな踊場を恢復すると共に Lüders 縞も僅か 6 本の幅廣き縞によつて平行部を覆ふやうになり、寫生 6 の焼鈍した試片 508 が降伏點 280 kg (26.3 kg/mm²) で 5 本の幅廣い Lüders 縞で平行部を覆はれるのと殆ど變りなくなるやうな状態となる。

かくパーライト組織を殆ど有しない極軟鋼では、焼入によつて過剩炭化鐵である境界炭化鐵を吸收せしめると、踊場と Lüders 縞との降伏點現象は消滅せしむることが出来る。焼戻は 160° の如き低温でも、この現象の恢復を來たし、焼戻温度の上昇と共にその恢復は著しくなつて、遂に焼鈍状態と同じ程度に近づいて行く。更に注意すべきは、かゝる焼戻効果がγ鐵への變態を伴はないことである。

2. 結晶粒の大きさの影響 結晶粒の大きさが大きくなるに従ひ、降伏點現象は減衰してゆくことは、既に C. A. Edward と L. B. Pheil との古い實驗⁵⁾ できれいに證明されてをる。第 31 圖にその報告にある結晶粒と荷



第 31 圖

重- 伸曲線の關係を示す。今、念のため同一材料から二つの試片をとり、一方の試片のみ結晶粒を成長せしめ、一方は正常状態のままとした。此の二片を抗張試験した結果は第 4 表の示す通りである。

第 4 表

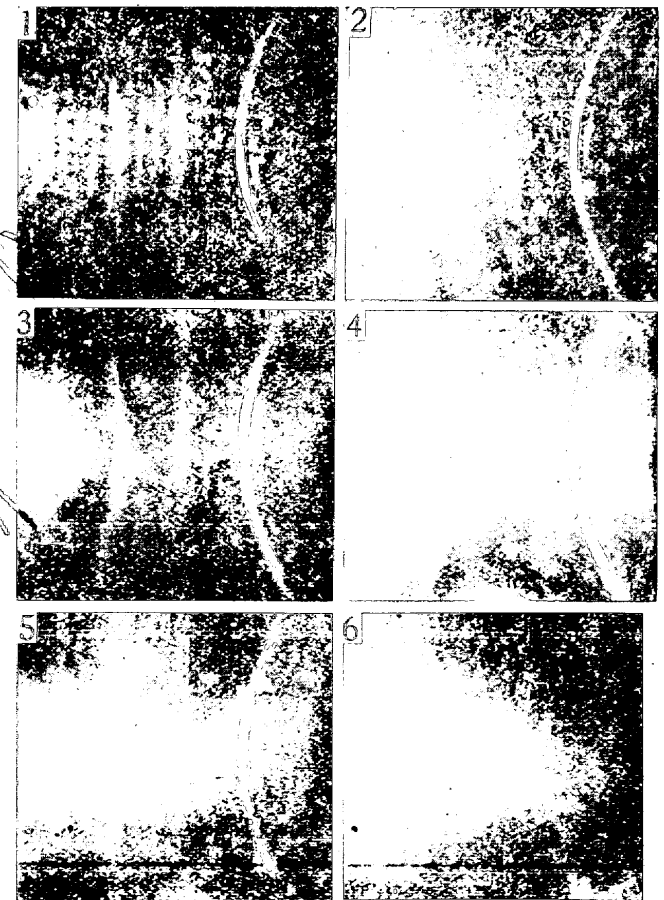
試片番號	結晶粒の平均直径 (mm)	彈性限 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸び (%)
405	0.014	25.4	38.3	46
406	0.255	26.7	39.3	35

此の二片の抗張試験に於ける應力-伸曲線は第 32 圖のやうである。結晶粒を成長せしめた方の試片 406 には降伏點踊場が出ないと同時に、Lüders 縞も第 22 圖に於ける寫眞 1~8 のやうに個々の結晶粒の中に入り線が順々に現はれて歪を示すのみで、第 12 圖寫眞 3~4 のやうな無数の結晶粒を貫く一つの面積よりなる劇然たる縞は現はれない。之に反し微粒の試片 405 に於いては普通のやうに、降伏點現象と共に Lüders 縞が現はれてをる。

3. 冷間加工と焼戻の影響 冷間加工せられた時に降伏點現象は減衰し、残留應力のみを除く低温焼鈍によつては恢復せられず、再結晶を伴ふ高温焼鈍によつてのみ恢復することは知られてはゐるも改めて系統的に研究してみる。

試料には冷間壓延した美裝鋼板を用ひ、これを 100°, 230°, 400°, 600°, 800° で焼鈍した。加工程度を見るために X-線寫眞をどつた。第 33 圖寫眞 1~6 にその干涉寫眞に示す如く、素材でも餘り冷間加工は激しく効いてをらず、400° までの焼鈍では X-線干涉寫眞には殆ど變化がない。600° の焼鈍に到て焼鈍効果が出でラウエ斑點が

第 33 圖

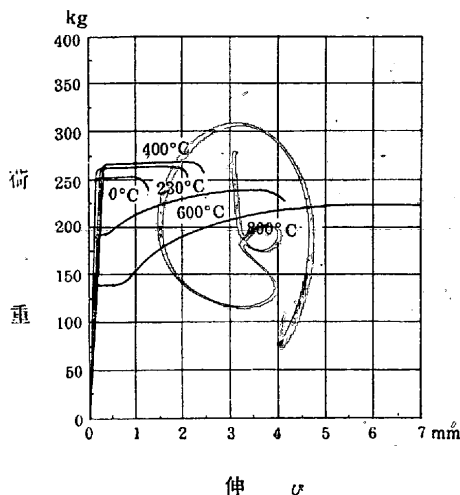


出づるが一方には尙纖維組織が完全にとれてをらぬ。800° に到て始めて焼鈍効果は完全となり纖維組織をもつた壓延

板は 400° 以下の温度に於ける焼戻では内力はとれたかもしれぬが、纖維状組織はそのままで、600° に到り始めて、再結晶を始め 800° に於て完全に全部が再結晶をしたことを知る。再結晶を伴はない低温焼鈍のことを單に焼戻と云つておく。

これらの熱処理を行った試料の抗張試験による荷重—伸曲線を第 34 圖に示す。400° 以下の焼戻ではその曲線の

第 34 圖



形は相似で、600° 焼鈍に到て始めて正常曲線と相似な降伏點踊場をもつた曲線となつてをる。

冷間壓延により纖維組織をもたせられた材質では、弾性限から直に最大荷重

に達して暫くの後局部收縮を起して切斷に到る。焼戻によつて内力を除かれるに從ひ、最大荷重と伸びとは幾分増すが、同形の荷重—伸曲線をたどることは同様である。ところが 600° の焼鈍状態に達すると、荷重—伸曲線は一變して弾性限の次に降伏點踊場が現はれ、それよりの塑性變形に於いても荷重も伸びと共に漸騰して後、最大荷重に達して遂に局部收縮を起す。800° 焼鈍に比して強さが大きく、伸びが稍小さいだけの差があるばかりである。

4. 焼鈍軟鋼の引張加工後の時効効果

1) 降伏點踊場に及ぼす影響 抗張試験によつて色々の程度まで引張加工を與へた後、軽く焼戻すると時効々果が著しく促進され、材質は硬化する現象がある⁶⁾。その現象を系統的に研究してみる。

試料は前節と同様 800° 1hr の加熱によつて正常化した美裝鋼板で、之に抗張試験により、それぞれ 5%、10%、20%、33% (局部收縮の起りかける點) の伸びを與へて後沸騰水で 1hr 熱して時効せしめ、その試片を再び抗張試験してみる。その成績は第 5 表のやうである。但時効後の抗張力も最初の試片の大きさから算出したものである。この力學的性質を第 5 表にまとめて示す。

試料 I は正常状態の試片を一氣に抗張試験したものである。試片 II~V は夫々伸び 5、10、20、33% まで伸ばし

第 5 表

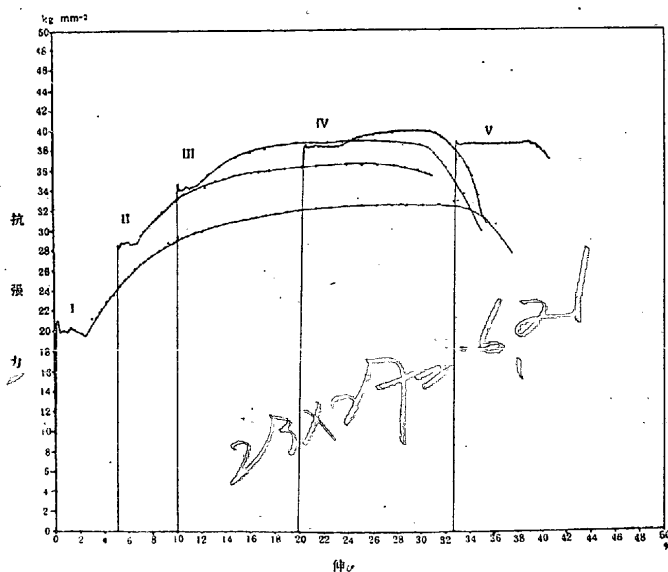
試片番號	始めに與へた歪		時効後の力學的性質		
	伸び (%)	應力 (kg/mm ²)	降伏點 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	伸び (%)
I	—	—	20	32.5	37
II	5	24	29	36.5	25
III	10	29	34.5	39.0	25
IV	20	32	38.5	40.0	15
V	33	32.5	—	39.0	8

て後荷重を下らして加熱して抗張試験したもので、後の伸びは時効後の試験だけの伸びを以て示す。

一般に金屬材料は抗張試験等で外力を與へれば、その外力を取除いた後も、それに相當する強度まで弾性限は上るものである。然るに時効々果を有するものは弾性限が前の與へた應力の強度よりも少し上るのが特徴である。軟鋼も時効する材料であるから弾性限が上ることは當然である。問題は那時、前節の如く冷間加工によつて降伏點踊場を失ふか、或は加熱時効によつて降伏點踊場を恢復するかである。

此の場合の結果を第 35 圖に示す。I は一氣に引張試験をしたもので、その途中に相當する伸び、5、10、20、33%

第 35 圖



の點で一旦荷重を下し、時効し、再び引張試験を行った時の應力—變形曲線を重ねて示したものである。圖に見る如く II、III、IV の試片では踊場を有する正常状態に近い曲線を示し、V のみ 壓延板のやうな冷間加工曲線を示してゐる。これは第 III 章第 3 節の抗張試験による組織の變化から見て、II、III、IV の如き引張加工では唯、裂罅帯や辻り線による變形が與へられるだけであつて、V の局部收縮に到て纖維組織化が始まるによるであらう。

2) Lüders 縞に及ぼす影響 (第 36 圖) 引張加工

による硬化は $100^{\circ} 1hr$ の時効により一層進められると共に、その後の抗張試験には降伏點踊場を示す。然らば降伏點踊場と不可分な Lüders 縞はどうなるであらう。當然恢復されてもよい筈である。

(イ) 降伏點踊場の途中で荷重を下して $1hr 100^{\circ}$ の時効をして後、抗張試験をしてみる。第 36 圖線圖 1 のやうに踊場の途中、即ち寫眞 1 の Lüders 縞が平行部の約 $1/3$ を覆った點 A で荷重を下して $100^{\circ} 1hr$ 時効する。再びこれに荷重を加へると前の降伏點 $20.0 kg/mm^2$ より遙かに高くなって $22.5 kg/mm^2$ に上部降伏點を現はした後は Lüders 縞が発生して、強さも前と餘り變らない下部降伏點 $19 kg/mm^2$ を示すやうになる。此の下部降伏點の値を保ちつゝ時効前に、Lüders 縞で覆はれなかつた部分を再び覆てゆかうとするが、この際は荷重は上昇して時効後の上部降伏點 $22.5 kg/mm^2$ に近い値を示すやうになる。この時の Lüders 縞の有様を寫眞 2 に示す。

(ロ) 他の試片を降伏點踊場の途中 A まで引張て Lüders 縞を平行部の約 $2/3$ まで出して置いて、荷重を落して、縞の痕がなくなるまで磨きなほして後 $100^{\circ} 1h$ 時効せしめて抗張試験を繰返してみた。磨きなほす前の Lüders 縞の様子は第 36 圖寫眞 3 の如くで、再荷重をかけると、荷重-伸曲線は第 36 圖線圖 2 の如くたどり降伏點 B に達するや前と反對の側から Lüders 縞が寫眞 4 のやうに生じ、續いて荷重は時効前の降伏點と略同じ大きき

$22 kg/mm^2$ に落ち下部降伏點 C を示す。此の時は寫眞 5 のやうに前に Lüders 縞に覆はれなかつた平行部は全部 Lüders 縞に覆はれてゐる。これから荷重は上り出し、Lüders 縞は前に一度犯した部分に喰ひこむ。時効後の上部降伏點に等しい點 D に迄荷重が上つてゆく間に寫眞 6 のやうに平行部は全部、Lüders 縞に覆はれて終ふ。續いて荷重が E・F と進むに従ひ、普通の場合のやうに Lüders 縞は寫眞 7 及 8 の如く肩の部に喰ひこんで行く、此の際、時効前に一度 Lüders 縞に犯された部と、新しい部とに現はれた Lüders 縞には判然たる區別がつく。荷重が増すにつれ此の區別も漠然となつて、全體一樣な梨地模様となるが、局部收縮は時効前 Lüders 縞の出なかつた部分から發生する。加工時効が加工されない部分と加工を受けた部分とを硬化する程度の異なるのは當然である。

(ハ) 降伏點を過ぎて後相當の歪を生じた試料が時効によって再び降伏點踊場を恢復するに際しても Lüders 縞の再生をみるや否やの問題に立入て見る。抗張試験により平行部に 5% の伸びを與へれば、試験には第 36 圖寫眞 10 のやうな肩まで喰ひこんだ Lüders 縞が現はれてゐる。荷重を下した後試片を磨きなほして、 $100^{\circ} 1h$ の時効を與へる。そして抗張試験を繰返す。その時の應力-伸曲線は第 36 圖線圖 3 と同様に、點 A で荷重を下して時効し、再びこれに荷重をかけ、降伏點 B で Lüders 縞が平行部の上下から出た所で寫眞 11 を撮影し、踊場の終

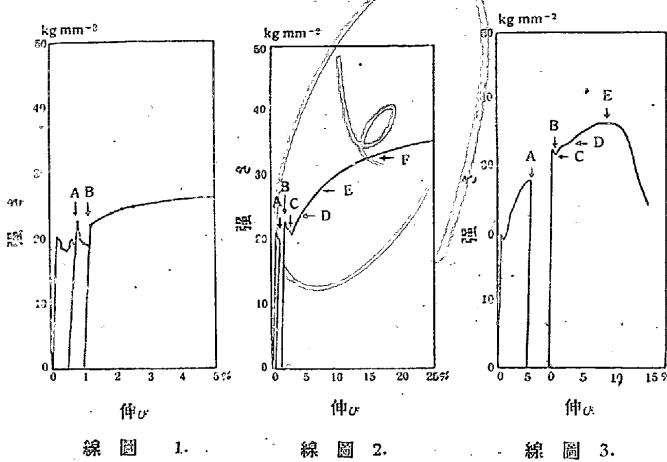
第 36 圖

12x57=6.84



6
8

第 36 圖 (續き)



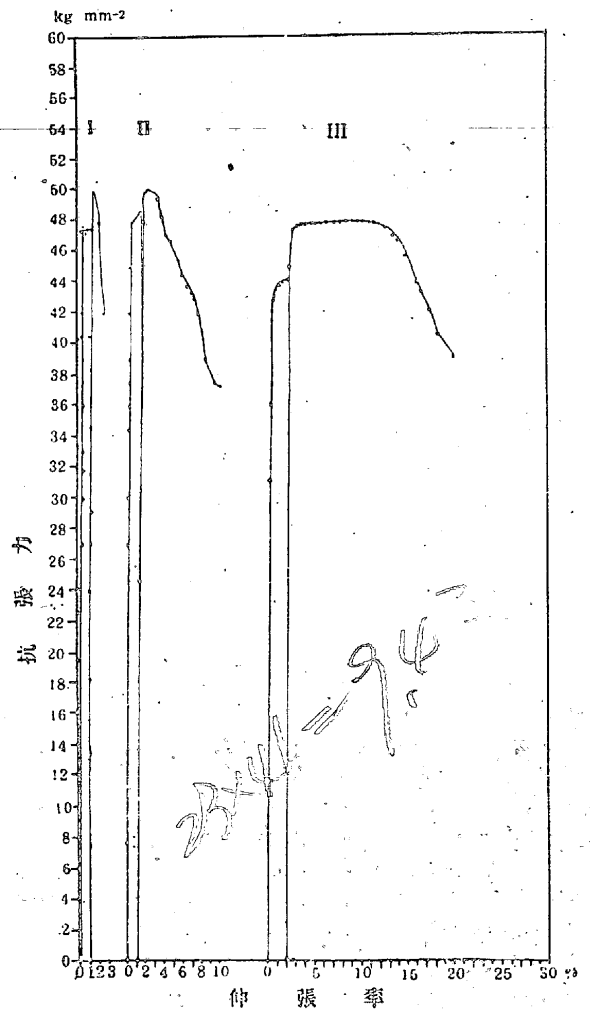
た點 C で寫眞 12 を撮影した。更に荷重を増し、點 D に到れば寫眞 13 のやうに Lüders 縞は點 A で時効前に犯した部分より廣く肩の部分に喰入り、點 E の最大荷重に達すれば寫眞 14 の示すやうに Lüders 縞は肩部へ奥深く喰ひこんでをる。その縁の弧の幅は 9.5mm に達してをる。之は始めから一氣に抗張試験を完了したものには見ないことである。切斷後の状態は寫眞 15 のやうで前の場合と餘り異なる。

Lüders 縞がこの場合肩の部分へ深く喰ひこむのは當然である。平行部は加工時効により抗張力が 37kg/mm^2 までも増してゐるが、幅廣き部分は時効前加工されてゐないが下部降伏點はもとのまゝでその強さも 19kg/mm^2 位に止つてゐると見たがよい。即ち平行部の最大荷量 37kg/mm^2 に對して Lüders 縞の縁邊がとゞくべき部分の降伏點の強さ 19kg/mm^2 は $1/1.95$ しかない。しかしてかゝる薄板では Lüders 縞は廣い面に於いては張力に直角に出で、平行部の軸に平行な張力は Lüders 縞の縁邊の弦に直角と見れば、平行部と Lüders 縞の縁に於ける張力の強さはその幅に逆比例してよい。荷重が最大値に達した時、平行部では抗張力に等しい應力が作用するが、Lüders 縞の縁では降伏點に相當する應力を受けてをるべきである。故に此の二つの應力の比は幅の比に比例すべきである。上の實驗に於いて應力の比は $37:19$ であり、幅の比は $9.5:5$ であつて、略同じ値を持つ。故にかく平行部だけを加工時効して後抗張試験すれば肩に出る Lüders 縞の擴りは大きくなるのが當然でその擴る割合も計算に一致する。寫眞でも見らるゝ通り、加工時効された部分と、加工せられなかつた部分とでは Lüders 縞の出方は異なるが、降伏點踊場が恢復せられるやうに加工部分と雖も、時効により

Lüders 縞が発生せしめられるやうになる。但加工が進んで纖維狀組織を生ぜしめるやうになれば Lüders 縞も現れなくなる。

5. 冷間壓延材の加工時効 第 3 節に用ひたと同様な冷間壓延美裝鋼板の冷間壓延のまゝのものゝと 100°C 及 400°C で 1h 焼戻した材とを引張加工して後 100°C 1h 時効せしめて抗張試験を行た。この 3 種の材料は第 3 節で示したやうに纖維狀組織をもつた再結晶を始めてゐないものである。

第 37 圖



引張加工には全體の伸びの約半分の伸びを與へた。荷重を下して後 $100^\circ, 1\text{h}$ の時効を與へた。その結果は第 37 圖に示す通りで、何れも時効硬化はしてゐるが、降伏點現象は全く現はれてゐない。即ち何れも加工時効後の荷重に對して、弾性限から直接最大荷重に達し、そのまゝ幾分の伸びを示して後、局部收縮に移つて切斷に到る。

此の際全體の伸びに對して局部收縮の伸びの大きなことは注目し値する。内部歪による内力が時効によつて緩和せられたため脆さが減少し、纖維組織による纖維の方向への

流れが容易になつたまま残つてをるためであらう。

V 軟鋼以外の金属材料の降伏点現象

1. 文献 降伏点現象は軟鋼に特に著しく他の材料には普通認められない。これを純金属に認めた文献は Armeo⁷⁾ 鐵にありとするものゝ外は P. Schönemaker⁹⁾ の銅が低温に於いて有するといふものゝみである。Armeo 鐵は純鐵でないが、一應實驗的に検査してみる。銅に降伏点ありとする實驗はこれを繰返す必要がある。

次に合金に於ては降伏点踊場は時¹⁰⁾に発見されてゐる。我國に於ては川合匡氏⁷⁾と鎌上龜吉氏¹¹⁾の論文に於いて特に取扱てある。川合氏は湯淺氏¹²⁾と同様降伏点後の應力-伸曲線に現はれる不連続と同列に降伏点踊場を論ぜられてゐるが、その異なることは既に第 II 章に於いて説明した。

しかし同氏の實驗中には、7/3 眞鍮及磷青銅に於いて、明かに踊場を発見出来る。鎌上氏は降伏点踊場を目的にした實驗を特にせられてゐるが、やはり市販の磷青銅、7/3 眞鍮、海軍合金、マンガン青銅、4/6 眞鍮に於いて、降伏点踊場を発見せられてをる。しかも、これらは悉く時効硬化するもので、時効硬化をしない銅や固溶體となる銅二元合金 (Cu-Al, Cu-Ni, Cu-Sn) には踊場は出てゐない、次の如き、市販の多元合金に於いてのみ発見せらるゝのは踊場と時効とは共に少量の不純物による脆い過飽和組織に於いてのみ発見するものであらう。しかも特定の温度で焼鈍したときのみ発見せられてゐる。(第 6 表参照)

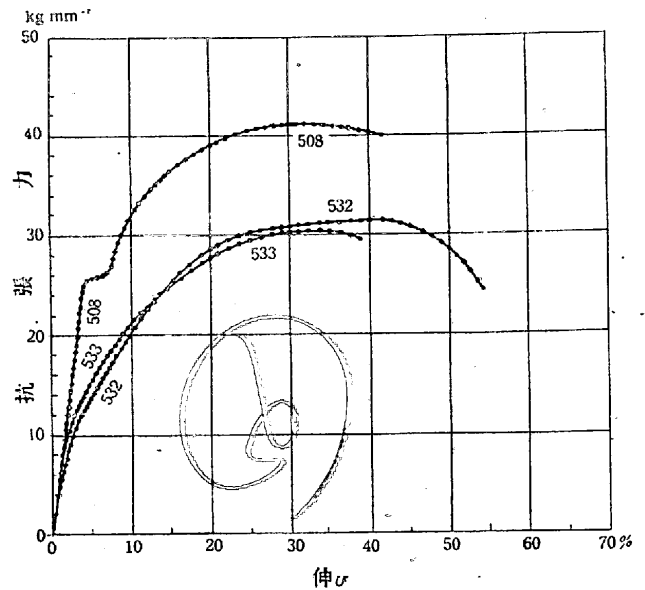
第 6 表 鎌上氏の降伏点踊場を発見せられた合金組成(%)

合金	焼鈍温度 °C	組成(%)						
		Cu	Sn	Zn	P	Pb	Fe	Mn
磷青銅	500~700	95.92	3.43	0.15	0.132	痕跡	—	—
7.3 眞鍮	500~550	69.4	0.07	30.26	—	—	痕跡	—
海軍合金	550	70.7	1.01	28.26	—	—	—	—
マンガン青銅	550~750	98.22	1.53	—	—	—	—	0.25
4.6 眞鍮	550	—	—	—	—	—	—	—

本實驗は實驗室で複製し難いから、その研究は追てなすことにするが、時効々果する所より見れば、過飽和固溶體から沈澱作用が行はれるものであらうし、恰度、軟鋼と同様な組織と見てよいであらう。よつて今は純鐵と純銅の場合を検討し、時効する輕合金の一種と比較してみることにする。

2. 純鐵 純鐵として日本電解鐵株式会社製の鍛造電解鐵棒と Armeo 鐵とを用ひた。正常化は真空電爐で 1,000°C 1h 熱し爐冷した。その抗張試驗結果は次の如くその荷重-伸曲線は第 38 圖のやうである。第 38 圖に見る

第 38 圖 508 軟鋼 532 電解鐵 533 Armeo 鐵



やうに弾性限に於いて強度-伸びの比は急激に減するけれども一定な荷重の下に伸びが増し踊場は全く見られない。

第 7 表 純鐵試驗表

試片 番號	材質	形		降伏点		抗張力		伸び	
		厚 (mm)	幅 (mm)	標点 距離 (mm)	荷重 (kg)	強度 (kg/mm²)	荷重 (kg)	強度 (kg/mm²)	(mm) (%)
532	電解鐵	4.25	5.01	20	250	11.7	627	29.3	11.58 57.9
533	Armeo鐵	0.77	5.01	20	146	12.0	108.4	23.2	7.78 38.9
508	美裝鋼板	1.02	5.01	20	134	26.3	210	41.2	9.59 48.5

3. 純銅 低温では踊場が生ずるといふ説に對して實驗を繰返したが、悉く反對の結果を得た。低温で抗張試驗をするには試片を油槽に入れたまゝ、Amsler 試驗機に取付けて引張た。即ち太い硝子管の底に二つ割のコルク栓をなし、その間に板狀の試片をはさんだ。油のもれは水を塗て凍らして止めた。

硝子管の中に石油エーテルを入れ、固形炭酸又は液體空氣で所定の温度に冷して試験した。温度は平行部の兩端と中央に銅-コンスタンタン熱電對を半田付して測定した。伸びは實驗 1 及 2 では Amsler の自記計によつて荷重-伸曲線を描かして、それから測定したが、實驗 3 では第 I 章に記した特殊測伸計を用ひた。

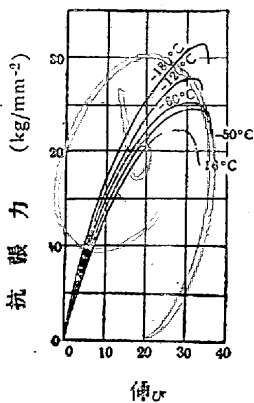
實驗(1). 前に記したと同じ形の試片により實驗した。その結果は第 8 表と第 39 圖との如く、如何なる踊場も発見出来なかつた。

第 8 表

試驗温度(°C)	+16	-60	-80	-120	-180
抗張力(kg/mm²)	22.5	25.0	26.5	28.0	32.0
伸び(%)	35	37	37	33	32

實驗(2). 精度を上げるために試片の長さを長くしてみた。即ち徑 5mm の丸棒を 45cm に取り、その兩端に鐵棒

第 39 圖



をはめこんで銀鑑でつけて試片とした。之を焼鈍して前と同じ様な方法で冷やして抗張試験をなした。

しかし、餘り長すぎたため、試片の平行部に相當する銅棒の鐵棒から出てをる中央部 300 mm にわたって寒劑の溫度に 10 °C 近くの不均一をまぬがれなかつたため精度は上げられたと

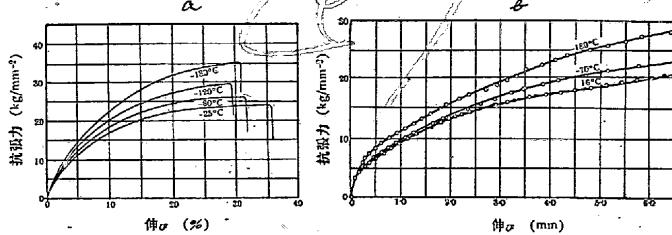
は云へないが、その成績を第 40 圖 a に示しておく。

實驗(3). 再び本論に用ひてゐた試片の形、即ち幅 20 mm, 長さ 150 mm, 平行部の幅 5 mm, 長さ 20 mm の板狀試片に戻り、これに第 3 圖に示したやうな特殊測伸計をつけて 0.1 mm までの伸びを讀みつゝ試験した。

その結果は第 40 圖 b の如く些かの踊場をも發見出来なかつた。P. Schönmaker の實驗とどうしても一致せず、銅には降伏点踊場があるとはどうしても受けとれない。

以上の如く、純金屬には降伏点踊場が存在しないといふ

第 40 圖



のが確からしい。即ち均一な結晶粒のみから成立つ組織には降伏点現象のやうな不連続は發生し得ないと見るのに不都合はないと考へられる。

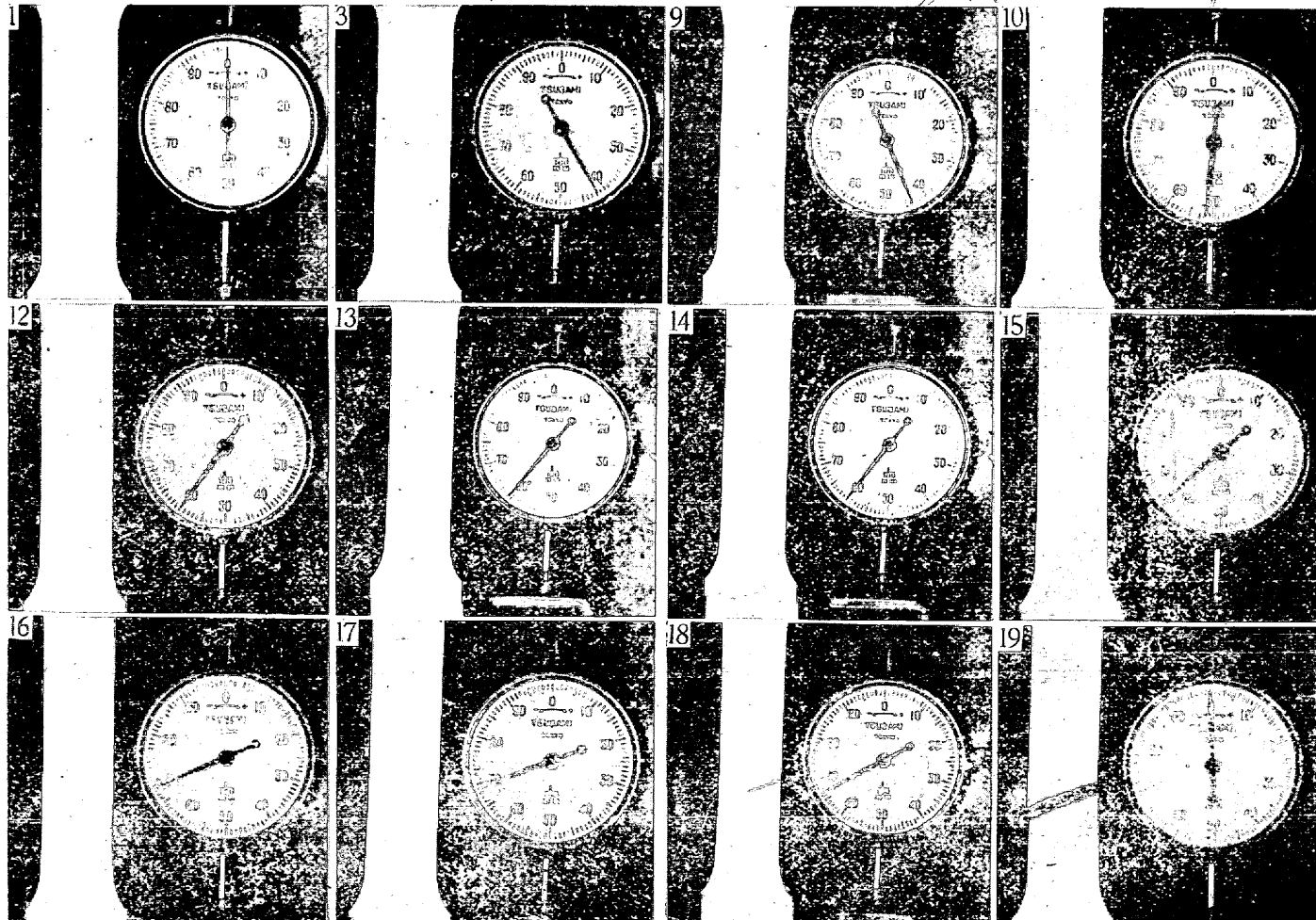
4. アルミニウム合金 時効々果を有する合金は第 1 章第 2 節に述べた第三群に屬する不連続をその荷重-伸曲線に表はす。その代表的のものとして次の如きアルミニウム合金板(航空研究所堀口貞雄氏より惠與)を試験した。

第 9 表 試料の組成及力學的性質

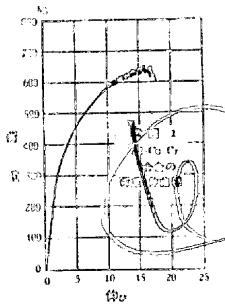
組成			試片の形			降伏點		抗張力		伸び
Cu (%)	Cr (%)	Al (%)	厚 (mm)	幅 (mm)	平行部の長さ (mm)	荷重 (kg)	強度 (kg/mm²)	荷重 (kg)	強度 (kg/mm²)	%
5	0.5	殘部	0.95	20	60	270	14.5	650	33	2.8

530°C 1h 加熱後水にて急冷して 100 日常時効せしめたものである。

第 41 圖



第41圖(續き)



試験中に表面に起る變化を第II章の装置によつて活動寫眞に撮影した。その中の代表的部分を引伸して第40圖に示す。試験機の精度をかへたので荷重を現はす目盛板は1目盛 3.85 kg (100 kg 26目盛) を示す。

降伏點は 270 kg (目盛 70) であるから、それまでは、試片上に何等肉眼的の變化も現はれる筈がない。しかし實際にはその點で Lüders 縞らしいものは發生せず、第41圖線圖1の荷重-伸曲線が、荷重 384 kg (目盛 90) に於いて始めて不連続を示し出すまでは、何の變化も現はれず、目盛 121 (荷重 480 kg) に到て始めて平行部の中央に、極めて微かながら2本の斜めな縞が現れた。目盛 130, 荷重 500 kg に到れば、同じやうな平行線が何本も明瞭に認められ、續いて目盛 135, 荷重 520 kg では平行部の下方に多くの平行線が生じ、寫眞9 (目盛 146, 荷重 560 kg) には上方にも多く出てゐる。寫眞10 (目盛 152, 荷重 585 kg) では平行部全面に多數の平

行線が見えてゐるであらう。それ以上になると、こゝに示した寫眞では餘り分らないが、實際は此の線が繰返し繰返し、前に線のあつた上に重なつて出て來るのである。寫眞17では荷重 650 kg (目盛 169) に達し、寫眞18 (目盛 165, 荷重 635 kg) では此の線の一つより局部收縮が始まり、續いて切斷してしまふ。但局部收縮の線、即ち切斷の線は前の互に平行である迂り縞と $2.4/18.0$, 即ち $7^\circ 40'$ の傾斜をなしてゐる。

茲に注意すべきは此の斜線は荷重の増加と共に益々激しく現はれ、且前に現はれた面にも數回繰返して現はれることである。又此の縞は幅が狭く、且隣の縞とは續いておらず、飛び々々に現はれてゆく。その様子は Lüders 縞とは全く異なるものである。軟鋼の靑脆溫度で現はれる第三不連続群として現はれる荷重-伸曲線上の不連続と、それに伴ふ「迂り縞」と稱へておいたものと一致する現象である。例へば第13~第15圖にある迂り縞と同性質のものであつて、第一不連続群、即ち降伏現象とは全く異なるものである。

(理化學研究所彙報第17輯第12號昭和13年12月)

第2部 理論的解釋

1. 蜂窩組織

1. 降伏點に關する實驗の結果* 前報に於いてなした降伏點に關する實驗の結果を要約して見る。

1) 軟鋼は抗張試験に於いては特異な荷重-伸曲線を示す。即ち彈性限を超えるや、彈性限よりも寧ろ小さい、しかも、一定な荷重で塑性變形を起して所謂「降伏點の踊場」を示し、特別な變形後は荷重と伸びとは兩々増加して一般軟金屬と同様な變形をなす。

2) 荷重-伸曲線に踊場が現れる間に、試片には Lüders 縞が生じて平行部を覆てゆく。踊場と Lüders 縞とは比例して進み、踊場完了と同時に Lüders 縞も平行部を覆ひつくす。

3) 試験溫度が上昇するに従ひ、踊場の塑性變形にも凹凸を生じ、踊場全體の伸びは短くなる。Lüders 縞は一度に幅寬い縞となり、一本一本の縞は踊場の凹凸と一致す

る。この不連続を第一不連続群といふ。

4) 試験溫度の上昇するに従ひ、荷重-伸曲線には踊場の後の塑性變形にも凹凸を示す。最大荷重に於いてその不連続は最大となる。此の不連続を第三不連続群といふ。Lüders 縞が試片の肩の部に喰こんでゆくために不連続が生ずる。これを第二不連続群とするが、第三不連続群に重なつて生ずるので一寸區別し難い。

5) (3)と(4)との現象は、靑脆溫度 250°C 前後に於いて最も甚だしく、 300°C を超えると、第一不連続群と降伏點踊場は消滅してしまひ、第三不連続群だけが残るがそれも次第に減衰する。

6) 第三不連続に一致して試片の上に斜に縞が生じる。之を「迂り縞」と稱へておいた。迂り縞は Lüders 縞とは全く異なるもので幾重にも重て生じ、最後にその一つから局部收縮が生じて切斷に到る。

7) Lüders 縞中の組織の變化は甚だ認め難く、顯微鏡の焦點を狂はすことによつて輝やいた網狀組織を認める

* 黒田正夫: 鉄と鋼

が、これは結晶粒とは関係なく、數個の結晶群よりなる組織で網目は結晶粒中を通り結晶境界を通らない。

8) この網状組織は變形の單位をなし、局部收縮を起して纖維状組織になる迄保たれる。

9) 網状組織の網の境目には裂罅が現はれて一つの裂罅帯を形成する。變形單位の結晶群は裂罅帯を境にして互に變位する。

10) 裂罅とは塑性變形に於いて生じた變形面で、結晶の劈開面に生ずる迂り線とは異なる。數個の結晶群を貫通し、且パーライトの如き異物は避けて迂回する。結晶の劈開面に生じた純粹な迂り線は裂罅とは別に存在し、各結晶に特有な方向をもつてをる。

11) パーライト組織を持たない軟鋼でも焼入によって硬化するが、同時に降伏点現象は衰退する。

12) 焼入によって降伏点現象の衰退した鋼も、焼戻によって降伏点現象を恢復し、焼戻温度の上昇と共に正常状態に近づいてゆく。

13) 結晶粒の成長と共に降伏点現象は衰退し、個々の結晶の迂りによって變形し、Lüders 縞の代りに、迂り線が認められるやうになる。

14) 冷間加工により纖維組織になった材料には降伏点現象は現はれず、焼戻によつても恢復しない。唯再結晶を伴ふ焼戻によつてのみ始めて降伏点現象の再生をみる。

15) 引張加工で硬化させた材料は僅か 100°C の焼戻によつて充分降伏点の恢復をなし、同時に硬化もする。但引張加工が局部收縮を來すやうな大なる加工によつて組織が纖維状となったものは、かゝる軽度の焼戻である時効によつては降伏点現象を恢復しない。

16) 冷間加工によつて纖維状組織となったものを引張加工後時効せしめても、降伏点現象は現はれない。又、降伏点現象が恢復せられない位焼戻した材に於ても同様に降伏点現象は加工時効によつて生じない。

17) 純鐵にも降伏点現象はない。

18) 低温に於いても純銅には降伏点現象は現れない。

19) 時効効果の著しい合金には第三不連続群が発生しやすい。

20) 軟鋼に似た組織を有する合金には降伏点現象が現はれる。

2. 軟鋼に降伏点現象の現はるべき原因 非鐵合金にも降伏点現象は現はれるものがあるとはいへ、軟鋼のやうに著しいものはない。然らば軟鋼のどこにそんな原因があ

るのであろうか。

軟鋼が他の金屬や合金材と異た、特に著しい力學的性質を示すのはその焼入や焼鈍による熱處理にある。しかも焼入のよく効く高炭素鋼でも、又は炭素含有量の極めて少ない純鐵に近いものにも、何れも降伏点現象が極めて著しくないといふことは、地鐵結晶粒の存在を必要とし、多少の炭素が之に伴はなくてはならないことを示してゐる。若し、パーライトなり、炭化鐵なりが主要組成であるとしたなら、高炭素鋼ほど降伏点現象は著しかるべく、又、地鐵のみが主要な素であるなら純鐵にも著しく現はれなくてはならないのに、事實は兩方の場合とも反對の結果を示してゐる。故に降伏点現象、即ち降伏点踊場と Lüders 縞の發生は地鐵及び少量の炭化鐵の共存よりなる組織に原因を求めなくてはならない。

然るに従來から此の組織に無關係に他の機構によつて降伏点現象を説明しやうと試みられたものがある。今此の不均一組織によつて説明する前に、他の説明が事實に適しないことを検討してみる。

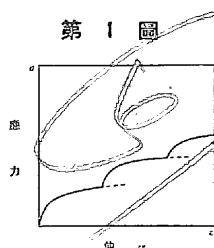
1) 地鐵の結晶型の説 多くの金屬や合金に體心立方格子よりなる立方結晶をなすものが少いの鐵は體心立方晶よりなる普通の金屬であるといふ點に鐵の特異性の重點を置く説であるが、之は純鐵には降伏点現象が甚だ微弱であるといふ點より事實に合致しない。

2) 結晶迂りの説 單結晶の迂りが多結晶質全體の迂り變形にそのまま應用出來ると思ふことに、その説明の基礎を置く説である。しかし、多結晶質全體として考へる時は個々の結晶粒の迂りなどの方向性は考へられない。非常に多くの結晶が確率的に自由な方向に均等に向つてゐる筈であるから、特定の方向性を與へることは出來ない。即ち全體として全く均等な連続的の性質より考へられないではないか。

たとへ個々の結晶は、その結晶軸の應力に對する方向に

よつて、迂り面が變るたびに不連続的に應力-變形の關係が變化してゆくことは第1圖のやうにあつても、多結晶質では一つの應力に對して、結晶軸は無數にしかも種々の方向に存在する以上、全體の變形は各單位

結晶の變形を少しづつ變へて累積したものとなるであらうから、その全體の和は全く連続的な變形とならなくてはならない。



3) 結晶じりと結晶粒界干渉説 結晶じりが多結晶質では不連続な變形を與へられないので、結晶じりで不連続を説明するために結晶粒界を考へて、結晶じりが結晶粒界で隣の結晶によつて干渉され、全體が一度にじり出すまでは内力のため、或る結晶はじり變形を止められてをるといふ説である。互の結晶が支へ合てじりがある程度まで支へることは多結晶質が單結晶より遙かに大なる弾性限を有する事實を説明するために必要な説明である。しかし、それは弾性限を上昇せしめ、その後の塑性變形をもじり難くすることには、尤もな説明であるが、之が軟鋼その他の特殊な合金だけに降伏點跡場を與へ得る説明にはならない。

單に結晶じりだけで説明し得る現象は一般の多結晶質の變形の共通な性質だけで特殊な合金、特に軟鋼に限つた特殊性をもたすことは出来ない。此の説も降伏點現象の特殊性を認める時には、成立しない説明である。特殊性を認めないにしろ、應力が特殊の値を有する時だけに特に大きな歪を與へ得るといふ説明は出来ない。

4) 時効説 此の説が提出された原因は第一不連続群と第三不連続群との混同によるものである。第三不連続群の説明には都合のよい説であるが、第一不連続群の説明には適當でない。第一不連続群と第三不連続群とが全く別種なものであるといふことを認める以上、第三不連続群の説明に都合のよいもので第一不連続群の説明は出来ない。

第三不連続群の説明にしろ、こつた部分が時効硬化するといふだけでは何故に急激なる不連続的な荷重の落下があるかといふ説明には不充分である。こればじり面は硬化するといふのは時効々果がなくても存在する一般的のことであつて、急激な不連続の説明には不充分である。

5) 窒素説 之は製鋼過程に於いて窒素の多く入るベッセマー鋼等は特に降伏點現象が著しいから、窒素が降伏點現象の原因であらうとする説であつて、現象の發生機構には深く立入てをらない實驗的の推論に過ぎない。しかし、事實である以上否めない説であるが、説明としては甚だ不充分なものである。

6) 不均一説 之も軟鋼に於いて、降伏點現象の特殊性を認め、その地鐵と炭化鐵や窒化鐵との不均一組織がある故、特殊の不連続現象が存在し得るといふ説であるが、窒素説と同様に餘り説明的のものでなく、事實を述べてをるものであるから、不合理な點はないが不充分である。

以上のものが従來稱へられてゐた説明であつて、降伏點現象の原因として結晶型の特殊性、じりの不連続性、じり

と結晶粒界との干渉による不連続性、窒素の特殊性、組織の不均一性が重なるもので、前三者は不合理であつて、後二者は不充分な説である。更に時効説があるが、之は第三不連続群の説明に用ひられたもので、降伏點現象の説明ではなく、且、充分な説明ではない。

そこで、事實に立脚する不均一説に基き、不連続的な降伏點現象の發生機構を説明し、續いて起る塑性變形中の不連続、即ち第三不連続群の發生機構の説明をも試みやうとするのである。即ち地鐵と少量の炭化鐵との共存による不均一組織をもつ軟鋼の特殊性を認め、これに降伏點現象の説明を求め同様の不均一組織をもつ合金のみに降伏點現象を求めれば、事實的に一致する説明を得らるゝ筈である。

3. 軟鋼の蜂窩組織 軟鋼の不均一な特殊組織は主として地鐵とパーライトと境界炭化鐵とである。

地鐵には普通の場合、マンガン、珪素、磷、硫黄等の不純物と共に炭化鐵が、固溶體として純鐵の中に溶けてゐる。窒素は検出が困難であるが、酸素、水素と共に多少含まれてゐると見た方がよいであらう。普通の炭素鋼では之等不純物は固溶體として地鐵に含まれて熱處理に拘はらず、常に溶解状態にあると思つてよいから、總てこれらの固溶體を地鐵と稱しておく。

但し、炭化鐵は常溫で0.004% C, 200°Cでは0.006% C, 變態點で0.04% C位固溶し、それ以上は析出されると報告)されてゐる。しかし過飽和状態も存在し得べく、ことに結晶粒の中央の方は過飽和が大きく、粒界近くは析出され易い。

析出された炭化鐵はパーライト中の炭化鐵の厚さ、即ち1 μ 前後までは結晶粒間に薄層として所謂境界炭化鐵として存在し、それ以上だと地鐵と共析晶パーライトを形づくつて塊状に集る。パーライトとなれば異物となつて熔滓等と共に包含物となつてしまふから、力學的の問題としては別に取り扱ふことが出来るが、境界炭化鐵は地鐵の結晶粒間に膠着材のやうに介在するから地鐵の變形に重要な役割をする。實際に於いて0.004% C以上炭化鐵があれば、析出されるわけであるが、析出された炭化鐵は結晶粒の周圍をぐるりと包むであらうが、顯微鏡では餘り薄いものは見られないから少しと切れたやうな部分もあるが、研磨や蝕蝕のため、薄いところは見えなくなつたのであらう。實際はつ

1) 山田勇喜峰: 金研, 3 (昭6) 224.

2) Gmelins Handb. d. anorg. Chem. 8. Auf 56 Eisen A s. 1240.

ながつてゐて、結晶粒を包んでゐると考へてよい。

此の炭化鐵の薄膜は地鐵の結晶粒を包み、その粒界を埋めて、全體として蜂の巣のやうな隔壁を成し、その室の中に地鐵が充満してゐると見ることが出来る。此の組織を蜂窩組織といつておく。隔壁の主體は炭化鐵ではあるが、こゝには窒化鐵も析出されるであらうし、その近くの結晶格子も歪んで硬い層を作るであらう。これらの色々の原因で硬くなつた隔壁のことを、全體ひつくるめて境界組織といつておく。要するに、軟鋼は地鐵と境界組織とよりなる蜂窩組織を有する故に、降伏点現象を發生するのであると考へる。故に同様な組織を有する合金にも降伏点現象は現はれてもよいわけである。

II 蜂窩組織による降伏点現象の説明

1. 蜂窩組織と降伏点現象との關係 地鐵が蜂窩組織をなしてゐることより外に降伏点現象の原因と認められるものが發見出来ないなら、その原因である蜂窩組織を崩壊することが出来れば、降伏点現象は減衰し、又蜂窩組織を恢復せしめれば降伏点現象は再び現はれる筈である。之を前報*の實驗結果によつて検討してみる。

1) 境界組織の吸引による蜂窩組織の崩壊 蜂窩組織を崩壊するにその境界組織を焼入によつて吸收せしめて見る。地鐵の境界炭素溶解量は温度の函数であつて變態点以上では全く吸收されてしまふ。故に焼入によつて境界組織の炭化鐵は吸收されて蜂窩組織の主體の一つである境界組織は消失されるであらう。その状態は*第29圖寫眞4に正常状態を、寫眞5に焼入状態を示した通りである。かく焼入した軟鋼は降伏点現象を現はさないが、焼戻の温度を高めてゆくと降伏点現象も段々と顯著になつてゆく。即ち境界組織乃至蜂窩組織と降伏点現象とは熱處理によつて可逆的關係を有することを示してゐる。

2) 壓延による境界組織の破壊 冷間壓延によつても蜂窩組織を機械的に破壊し、纖維狀組織となすことが出来る。即ち軟鋼は冷間壓延によつても荷重-伸曲線を全く一變して、踊場も消え、同時に Lüders 縞も出なくなる。即ち蜂窩組織の破壊は降伏点現象の消滅を來すことは、此の場合も亦事實が示してゐる。しかも再結晶を伴はない低温焼鈍では殘溜内力の取れるために多少の變化は起るが、降伏点現象は決して恢復しない。再結晶温度まで加熱して蜂窩

組織を再生せしむる焼鈍によつて始めて降伏点現象は現はれて來る。

3) 引張加工と時効々果 引張加工の如き弱い加工によつては蜂窩組織は完全に破壊せられず、結晶群にひびが入つたり、結晶中に沁りが起つたりするだけである。此の程度の破壊であると、僅か 100°C 1h の如き時効程度の焼戻によつて降伏点現象は恢復せられる。同時に時効硬化も著しく効くが唯強さが大きく、伸びの小さい荷重-伸曲線を示すやうになるだけで降伏点現象は立派に認められる。

引張加工も局部收縮の起るやうな大きな加工となつて、結晶粒が纖維組織を呈するやうになれば此の程度の焼戻によつては降伏点現象は恢復出來ず、降伏点現象の恢復のためには再結晶を必要とするに到る。

4) 冷間壓延板の時効々果 正常状態になした材であると引張加工後、時効によつて降伏点現象は恢復するが冷間壓延板及び再結晶に到らない焼戻をした壓延板では引張加工後でも 100°C 1h の如き時効によつては降伏点現象は恢復しない。即ち元來蜂窩組織を有しないものは蜂窩組織を有するものと同じ取扱をなしても降伏点現象は再生しない。

以上の如く熱處理にしる、機械的操作にしる、蜂窩組織を破壊すれば降伏点現象は消滅し、之を恢復すれば降伏点現象も再現する。かく蜂窩組織と降伏点現象とは不可分のもので可逆的關係を保てゐる。

2. 蜂窩組織による降伏点現象發生機構の説明 以上述べた如く實際の現象から、軟鋼に降伏点現象の存在することは軟鋼の特異な組織、即ち蜂窩組織によるに非ざれば他に原因を求め難く、又降伏点現象と蜂窩組織とは不可分な可逆的關係を示してゐることを歸納することが出来る。故にこの事實よりして降伏点現象の發生原因として蜂窩組織を考へなくてはならない。然らば此の二者の間に可逆的關係は如何なる機構の下に生じ得るであらうか。その説明を次に試みよう。

力學的に不均一な組織の材質に單一應力がかゝれば、各部分は同一變形を起さなくてはならないからその應力は各の組織に分擔されるであらう。蜂窩組織に於いても應力によつて變形が起る時、地鐵と境界組織は應力を負擔する主要應力要素となるであらう。然るに境界組織は脆いから、少し變形が増大すれば地鐵より先に切斷する。然るに蜂窩組織では境界組織が切斷しても地鐵があるから應力要素は地鐵のみに移て、地鐵はその時の應力に相當するまでの變

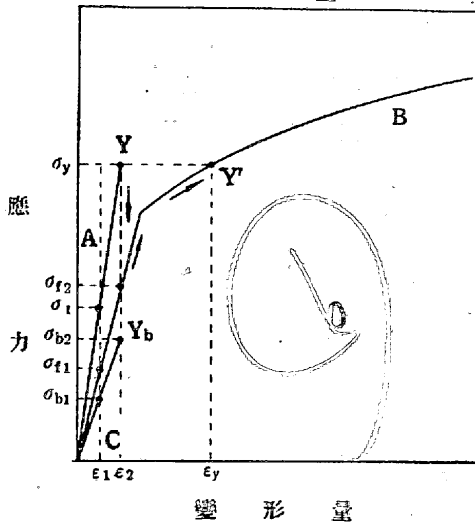
* 前報

形を生ずるであらう。その變形の量は境界組織の切れる瞬間の全應力に抵抗すべき地鐵の變形量を必要とする。應力—變形量の比の小なる地鐵では、同一の應力に對して境界組織より遙かに大きな變形量を生じなくてはならない。此の同一應力に對して生じた變形が降伏點の踊場として現はれるのである。又、境界組織が切れて地鐵に大きな變形の生じた部分が Lüders 縞として見ると考へることも、不合理ではない。かく降伏點現象は蜂窩組織に於ける應力要素が境界組織を含めた全組織から地鐵のみに移る過渡現象として考へられる。降伏點後は地鐵が主要應力要素となつて變形して行くから、その後は純鐵或は他の普通の柔軟金屬と同様な性質を示すのである。

境界組織は少なくとも白鉄位の強さ(抗張力 26 kg/mm^2)と脆さ(伸び 0, 硬度 $420 \text{ B}\cdot\text{H}$)を有するであらうが、地鐵は純鐵に近い強さ(抗張力 29 kg/mm^2)と粘さ(伸び 58%)とを有すると考へてよい。しかし、蜂窩組織のやうな複雑な構造を形成してをるから、此の値はそのまゝ用ひられないが、この程度に強さと脆さとが異なることだけは確かであらう。ヤング率は弾性限内では餘り異ならないにしても、塑性變形の應力/變形の比は大いに異なる。又應力に垂直な平面内に於ける

境界組織の全斷面積もも
とより測定が
出來ない。境
界組織と地鐵
との各の全體
の強さも測定
することは出
來ないから概
念的ながら、
線圖をもつて
説明すること
にする。

第 2 圖
炭素含有量

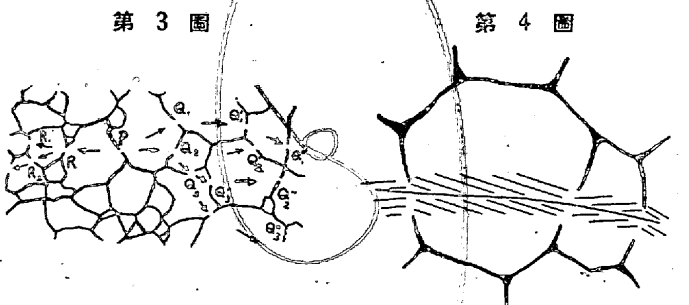


軟鋼の引張試験を考へる。試験片の受ける全應力を σ 、地鐵及境界組織の分擔すべき應力をそれぞれ σ_r , σ_b とし、 $\sigma = \sigma_r + \sigma_b$ と假定する。各應力が弾性限を超えない範圍の變形量 ϵ_1 を與へたときに於ては、この應力 σ_1 , σ_{r1} , σ_{b1} の關係は比例關係を保つであらう。第 2 圖に於いて $\sigma - \epsilon$, $\sigma_r - \epsilon$, $\sigma_b - \epsilon$ をそれぞれ A, B, C の線にて現はせば、各は弾性限内にあつては直線關係を保つ。最も弱い境界組織

の最大伸び ϵ_y に等しい變形量を全組織に與へる。その時の地鐵の分擔應力を σ_{ry} とする。伸が少しでも増せば、境界組織は切斷し、最早その分擔應力 σ_{by} を分擔出來ず、地鐵は試片全體の應力 σ_y を引受けなくてはならなくなる。即ちこゝで地鐵の分擔應力は σ_{ry} から σ_y まで飛躍しなくてはならない。従て變形も ϵ_y から $\epsilon_{y'}$ まで飛躍しなくてはならない。圖に於いて試片全體の應力—變形の關係は Y の位置から Y' に移たことになり、應力—變形曲線は OY—Y'B と進むことになる。即ち YY' 間に過渡現象が生ずるわけである。これを軟鋼に於ける降伏點の踊場發生機構と考へるのである。

試片の平行部全體に一度に此の現象が起れば極めて不連続的のものとなるであらう。250° に於ける試験の場合にかくの如き甚しき現象を見るのである。常温では平行部の一方の端より順々になしくづしに起て行くため、この過渡現象も細い不連続の集積として現はれ、踊場は一見水平のやうに見えるのである。試験速度が遅ければなしくづしでなく、かなりの長さにて互て現はれるので踊場中にもぎざぎざの不連続が生ずる。

その温度による影響は項を改めて説明することとし、今は境界組織の切斷により、應力要素の過渡現象を結晶粒群について機構的に説明するに止める。第 3 圖の如き蜂窩狀組織に於いて境界組織の強さは一様でないと考へる方が當然である。故に、最大伸びを超えた後の境界組織の切斷は第 3 圖の如く、ある一點で起るべきで、その點を P とすれば、P が切れればその兩側の點 Q, R は餘分な應力を受けて破壊すべく、續いてこの破壊はひび(裂罅)として



$Q_1, Q_2, Q_3, \dots, R_1, R_2, R_3, R_4, \dots$ と進んでこの斷面を通して境界組織の變形は傳播し、この斷面に於いて降伏點の過渡現象は行はれるであらう。此の斷面に於いて境界組織が切斷し終れば次の斷面 S, T, \dots と順々に次の境界組織は切斷して行くであらう。かく顯微鏡的斷面として順々に進んでゆけば降伏點現象は肉眼的には統計的な連続的現象として現はれるであらう。實際は此のひびの進行はも

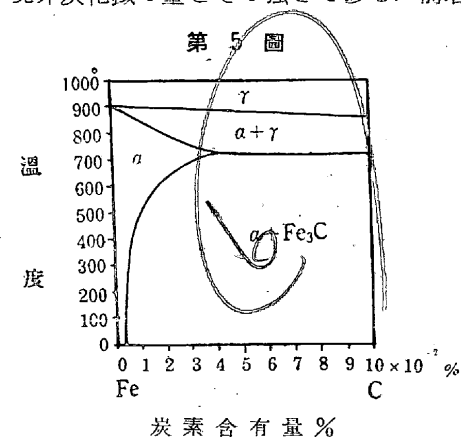
う少し集塊的に進行して眼に認め得られ、所謂 Lüders 縞といふのが此の表面の現はれに相當すると考へればよい。

顯微鏡的の現象としては裂罅帯と名付けたものがこれである。第3圖のPQRの近くをもつと擴大して第4圖に示す。P點で境界組織が切斷し、續いてQ點及びR點も切斷した。よつてP, Q, Rの境界組織が分擔してゐた應力をも、その中につまんでゐる地鐵だけで急に受持つたから、地鐵は變形してそれに應じた應力に抵抗しなくてはならない。しかし、その變形は境界組織が切斷した部分だけで起さなくてはならない。他の部分は切斷しない境界組織に密着し、境界組織が變形しなくては變形出来ない筈である。よつてこの切斷した境界組織の割目を結んだ線を通じて地鐵の激しい變形が生ずるべきである。これが裂罅帯として顯微鏡下に見え、且、結晶粒の方向とは獨立に境界組織の割目を結ぶ連続的な第3圖に斷線で示したやうな線であるべきである。

3. 降伏点現象に影響を與へる條件の解釋 降伏点現象は色々の條件によつて影響を被る。その機構を蜂窩狀組織をもつて説明してみる。

1) 試験温度 試験温度が靑脆温度(250°C附近)に近づくと、降伏点踊場の不連続は次第に著しくなり遂には一度の不連続で降伏点現象は終てしまふ。それ以上の高温になると再び不活潑になり、遂に300°Cを超えれば降伏点現象はなくなり普通の柔軟金屬のやうな荷重-伸曲線を示し、Lüders 縞も出なくなる。

此の原因として境界組織の強さが考へられる。即ち析出境界炭化鐵の量とその強さである。前者は第5圖²⁾に示した如く250°から急に吸収されて α -地鐵に固溶してしまふ。



一方境界炭化鐵の強度は測定出来ないが一般物質と同様温度上昇と共に脆さを

減じ強靱となり、次で軟化すると考へられる。よつて溶解度と強度とに及ぼす温度の影響を同時に考へて常温附近では脆く、200~250°Cで最も強靱となり、250°を超え

ると共に軟化吸収されるとすれば、此の問題は容易に解決される。境界組織が破れる時はひどと見てよい。ひど(裂罅)はある程度まで位置勢力が貯へられてゐるところへ機會となるきっかけが與へられると、その位置勢力は瞬間に運動勢力に変化して裂罅が生じ、その後にはさういふ勢力は消失してしまふものである。

温度の低い間は脆いから位置勢力は多く貯へられず、一端より切斷して行くが、温度が上り組織が強靱となれば次第に位置勢力の貯へられるべき量が増してゆく。荷重によつて與へられる勢力は境界組織中に弾性變形の位置勢力として貯へられるであらう。その貯へられるべき位置勢力も遂に堪えられなくなれば、その時に發散せられる量が増して行く。ために降伏点現象は著しく現はれて、踊場も、少數の激しい衝撃で終り、Lüders 縞の幅も廣くなつてゆくことは當然である。温度が更に上昇すると強靱の度を超えて軟化し、同時に炭化鐵が境界組織として析出せられず、地鐵中に吸収されるやうになつてゆけば、降伏点現象も衰退して行くのが當然である。

境界組織が最も強靱になり、吸収も餘り起らない點が、250°C前後で、それ以上では軟化、吸収が起て來ると考へれば、靑脆温度で降伏点現象が活潑になり、それを超えれば消滅してゆくのは當然である。逆にかゝる裂罅現象が活潑になることは材料を脆くひびが入り易くなることであるから靑脆現象もその結果であると考へることは不都合でない。

2) 焼入の影響 上述第1節(2)のやうに、降伏点現象は焼入により消滅し、焼戻により恢復するのが、それが γ -鐵への變態のためでないなら、地鐵が境界炭化鐵を吸収するためでなくてはならない。結晶亡りと降伏点現象との關係を論ずる假説については、その論據がわからず、内部歪乃至内力を云々しても、焼入によつて内力が増したから降伏点現象が何故消滅するのか解釋に苦しむ。

若し焼入によつて境界炭化鐵が地鐵に溶解するので³⁾境界組織が消滅することを認めるなら、境界組織の存在によつて發生した降伏点現象が焼入によつて消失するのは當然であつて、同時に焼戻による境界炭化鐵の析出が降伏点現象を恢復するのと解釋せられる。

3) 結晶粒の大きさの影響 境界炭化鐵は、パーライト中の一枚の炭化鐵の層より厚くはなれないと見てよい。

²⁾ Gmelins Handb. よりとる。前掲

³⁾ J. H. Whiteley J. Inst. Ir. and St. CXVI (1927), 293.

よつて結晶粒の直径 d の如何に拘はらず、その厚さの最大限には一定の値を有する。又、境界炭化鐵と共に境界組織を強化すべき窒化鐵や結晶格子の歪んだ層等の厚さも一定の最大値を有するであらう。境界組織の厚さは之等の和と考へられるから、従て最大値 ϵ を有すべきである。

同一断面の中の單位の幅に於ける境界組織と地鐵との分擔すべき應力の比は $\sigma_b \cdot t : \sigma \cdot d$ である。但し σ_b 及び σ はその應力強度、 t 及 d は試片單位断面積中に於ける境界組織の平均の厚さ及地鐵の平均直径を分數で表はしたものとす。

兩組織の變形量を常に等しいと見れば、

$$K_r \cdot \sigma_r \cdot d = K_b \cdot \sigma_b \cdot t$$

但 $K_r, f_b =$ 各組織の變形應力の比

降伏點で境界組織の切れる前後の他鐵の分擔應力の増加は

$$\Delta \sigma_r \cdot (\pi/4) d^2 = \sigma_{by} \cdot t \cdot \pi d$$

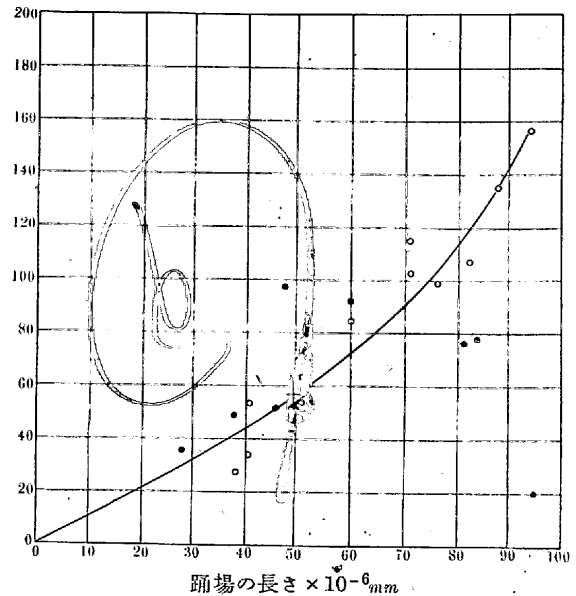
$$\Delta \sigma_r = 4 \sigma_{by} \cdot t/d$$

故に境界組織の厚さ t は最大値を有するから、境界組織の切斷による地鐵の分擔應力の増加は地鐵の直径の増大と共に小さくなる。

然るに、境界組織の切斷に於ける變形量はその分擔應力の如何に拘はらず、その組織の最大伸びである筈であるから、一定値 ϵ をもち更に、變形量は常に境界組織と相等しい筈であるから、境界組織切斷直前の地鐵の全變形量も一定値 ϵ をもち筈である。つまり、境界組織も全蜂窩組織の變形が一定量 ϵ に達するまで切斷しない。唯その切斷による分擔荷重の過渡量即ち地鐵の分擔應力の増加は地鐵の直径に逆比例して小さくなるべきである。この外力が一定でありながら地鐵の分擔應力の増加は、外力一定の下に新たな變形量の増加を必要とする。即ち降伏點の踊場の發生となり、踊場の長さは此の増加量を意味する。故に地鐵の直径の増大は踊場の長さを短かくし、降伏點現象の減衰を來すのである。そして、遂には降伏點現象を認め得ぬまでにする。結晶粒は不規則の形で、應力も結晶粒の方向や形に影響されるから、この計算通りには行かぬであらうが、踊場の長ささと結晶粒の直径の逆數、即ち單位面積中の結晶の數との關係を Edward & Pheil の實驗⁴⁾ にあつてみると第6圖のやうに、よく比例することを知る。

又、降伏點の始まる點の變形量は境界組織の伸びと見る

第6圖 結晶粒の大きさと踊場の長さとの關係(黒點と白點とは夫々二組の實驗の値)



べきで、その點の強さは主にその變形を起すべきときの地鐵の強さに支配される。地鐵自身も蜂窩組織には關係なく結晶粒の大きさと反比例して強くなることは純銅や純アルミニウムの如き金屬と同様に考へてよい。又、後述のやうな處理によつても強くなる。即ち降伏點の強さは主に地鐵の一定の變形量 ϵ を生ずる時の強さによる。

かく、結晶粒の増大と共に降伏點現象の衰退することは現象としても實際に證明し得ると共に、蜂窩組織によれば容易に説明し得るのである。これも降伏點現象が蜂窩組織によつて説明してよいといふ一つの根據を與へるものである。

一方、内力の殘留や、結晶迂りから説明しやうとすれば、焼入の際に全く逆なことになつて不都合である。即ち焼入によれば内力が増大し結晶迂りが困難になるに反し、結晶粒が成長すれば内力がとれ、結晶迂りが容易になる。此の二つの現象は内力や結晶迂りから見れば、全く正反對であるに拘はらず、降伏點現象に關しては同じ傾向を有し、兩方の場合とも降伏點現象の衰退を示してゐる。これは降伏點現象を内力や結晶迂りを以て説明することの自家撞着を示し、その説明の不適當なることを證明してをる。

此の現象からいつても、降伏點現象は蜂窩組織を以て説明した方が便利である。

4) 炭素含有量の影響 炭素含有量が 0.1% 前後である場合に降伏點現象は最も著しく、極度に少なく純鐵に近かつたり、或は地鐵結晶粒がなくなる程多い場合には降伏點現象は衰退する。

⁴⁾ C. A. Edward and L. B. Pheil: T. Inst. Ir. and St. CXII (1925), 79.

降伏点現象が蜂窩組織によるものとするれば、地鉄と境界炭化鉄との共存が必要である。故に炭素量が極度に少なければ境界組織は薄弱となつて、その作用をなさないことは焼入や結晶粒の大きな場合と同様である。又、炭素量が0.1%以上にもなれば餘分の炭化鉄はパーライトを形づくつて、境界炭化鉄を強化しない。然るに境界炭化鉄とならないパーライトは蜂窩組織に比し、斷然強いため、變形に際しては異物として地鉄の變形の邪魔をするだけで、自身は餘り變形しない。^{*} 故に炭素量もパーライトとしての増加は、降伏点現象の發生に邪魔にこそなれ、成長には助けとならない。そして地鉄の體積の減少も降伏点現象の衰退を伴ふことは當然である。かく、降伏点現象に及ぼす炭素量の影響も蜂窩組織を以てすれば容易に説明せられる。

4. 降伏点以後の塑性變形の説明 以上、降伏点現象を蜂窩組織によつて説明して來たが、降伏点で境界組織が切斷され、主要應力要素が地鉄に移つて後の塑性變形に於いて蜂窩組織は如何なる役割をなすか一通り考へてみよう。

境界組織は張力に對して切斷したが、塑性變形に際して剪斷力による横の運動に對しては尙抵抗し得る。しかし、既に裂罅帯が出來てゐるから、裂罅帯が迂り面となり得るので、餘り大きな抵抗とはならないであらうが、尙相當な抵抗をなし得て、純鐵とは變形が異なるであらう。又、溫度が上れば、炭化鉄の地鉄への溶解が生じるから色々の問題が生じるであらう。

1) 境界組織と伸び 境界組織は剪斷迂りにも勿論障害とならう。それで境界組織の甚だ弱い電解鐵と、少しは存在すると思へる Armco 鐵との間には伸びに大きな差を生ずる。^{**} しかし、境界組織が十分に生ずれば、炭素量が少し増しても餘り影響ないため、Armco 鐵と軟鋼との間には餘り著しい差はなくなる。しかし、此の問題は蜂窩組織のみで解決すべきでないかもしれない。地鉄そのものの性質も多分に影響するであらう。

2) 加工時効々果 焼鈍された地鉄でも幾分かの過飽和は免かれぬ。結晶粒の周圍の境界の自由面に近いところは原子の移動も樂で、過飽和の炭化鉄は充分に析出されて平衡状態に近づいても、中心に近い部分の炭素原子は充分に粒界まで、移動出來ないであらう。ところが、中心であつた部分に自由境界面が生じ、移動し易い溫度に置かれたら、そこに新たな炭素原子の析出があつてもよい。

この現象は引張加工で裂罅を生ぜしめておいた後、時効効果の活潑になる溫度に熱すれば當然發生しなくてはならない。實際に於いても、引張加工後の時効^{*}により、降伏点現象は恢復し、蜂窩組織の再生したことを必要としてを。即ち、引張加工によつて生じた裂罅面は炭素析出に對しては新しい自由境界面となり得るから、若し炭素原子の運動を活潑ならしめる溫度に熱すれば、過飽和の炭素原子は此の自由境界面に析出されてよい。此の過飽和の炭素原子は炭化鉄として、裂罅面を癒著せしめ得るであらう。そしてこゝに新たな境界組織は結成せられて、前より一層細かな蜂窩組織は生じ、降伏点現象も亦再生し得ることにならう。そして蜂窩組織が細くなるために降伏点は強化されるであらう。勿論地鉄も變形のために硬化されてはゐるが、降伏点の踊場の強さも強化してゐるのは蜂窩組織の前に破れたところは癒著によつて強化され、より以上強いところでなくては破れなくなつたためと考へてよいであらう。

これが引張加工による時効硬化の原因として考へらるゝところであつて、その説明には矛盾はないと思はれる。しかして時効溫度では、纖維組織は正常状態に戻り得ないから、纖維狀組織になつたものでは蜂窩組織による現象は起り得ない。引張加工にしても、局部收縮をするやうな大きな加工を與へれば、壓延等による加工と同様、纖維狀組織となり、時効によつて降伏点現象は起り得なくなる。

3) 試験溫度 引張加工を與へた後、時効溫度に保つて時効硬化すると、降伏点現象が恢復されるが、これを同時にすれば、同様な現象は起るとは限らない。時効々果は時効といはれる位、時間を第一の函数とする現象であるから、いくら緩徐に引張ても進行状態で熱したのと静止状態に放置したのとでは全く同じ現象は起り得ない。

時効々果は過飽和な炭素が自由境界面に析出せられることであるといふ前提を許すなら、その移動時間が問題である。連続的に變形による裂罅面に析出した炭素原子が集まるとすれば、裂罅面は充分の析出がないうちに變形せしめられるから、強靱な境界組織は生ずる暇がない。それで引張應力に抵抗の出來る蜂窩組織は形成せられない。然し變形の主要面であつた裂罅帯を癒著して迂り變形に相當の抵抗を與へ得る位のことは考へてもよい。そのため迂り變形が裂罅面で出來なくなると、他の部分即ち、裂罅帯の生じ

* 前報第3章第4節

** 前報第5章第2節第37圖

* 前報第4章4

なかつた蜂窩組織の残部で迂り變形を餘儀なくされる。

引張應力に對しては挫屈は生じないが、剪斷應力に對しては挫屈が生じる。よつて塑性變形の進んだ場合は剪斷迂りを生ずべく、よつて挫屈が起り、ために Lüders 縞のやうに、裂隙として幅ある面積の變形が一度に生ぜず、挫屈による細い迂り縞が生じると考へられる。そして挫屈し易いところから挫屈は生じ、次第に大きな荷重でなくては出なくなる。従て之に伴ふ迂り縞も不連続も次第に大きくなり、遂に全部が一樣な強さの下に、迂り縞も盛に出だして最大荷重に於ける大きな不連続群となつて現はれるのである。

此の機構には境界組織のやうな不均一組織があれば充分であつて、蜂窩組織として全部が連絡してをる必要はない。よつて脆い境界組織がべつとりと結晶粒を包む必要がないから、さういふ不均一組織は蜂窩組織を必要とする軟鋼より多種の合金中に存在し得るであらう。即ち、時效によつて硬い組織を生ずるものなら、その硬いものがどんな形をしてをつてもよいから、時效々果する材料には何れも此の第三不連続群に相當するものは存在し得べく、實際にも時效合金には認め得るのである。

III. 模型による力學的説明

1. 降伏點踊場の生成模型 以上で、降伏點現象は蜂窩組織によつて生じ、蜂窩組織を崩壊消失せしむれば同一組成の物質にも降伏點現象は消失することを實驗的事實より歸納して説明して來た。然らば、之を模型的に再生出來ないかといふことは興味あることである。蜂蜜のつまつた蜂巣で實驗してみると面白いであらうが、今は金屬を使って模型の製作を試みてみる。その模型も蜂窩状にしたいのであるが、製作が困難であるから、蜂窩組織の一断面として脆くて弱い境界組織と粘くて強い地鐵とが横に列んでをって上下面が固定してある模型を作ることにした。即ち、地鐵に相當する粘い線金と境界組織に相當する脆い線金とを一緒に一束として、その全體の抗張試験をしてみる。蜂窩組織は此の模型を縦に幾組もつなげたものと思へばよく、この模型は一本の Lüders 縞の出た短い長さだけ相當する。

かゝる不均一な荷重-伸びの關係をも線金の束を同時に抗張試験すれば、同じ伸びに對して、各線金は各の應力變形比 K に相當する應力によつて荷重を分擔するであらう。しかし脆い線金は細いため直に切斷し、分擔してゐた

その應力は粘い方の線金にかゝるであらうから、その線金は急激に伸びを生じるであらう。そしてそこに、一本の Lüders 縞に相當する降伏點の踊場が生ずる筈である。この方針の下に次のやうな實驗をなした。

1) 銅板を用ひた模型 冷間壓延のまゝの銅板を脆い組織とし、それを焼鈍したものを粘い組織として、硬板 1 枚、焼鈍板 4 枚を組合して一つの模型を作た。

各板は厚さ 1mm, 幅 20mm, 平行部の長さ 25cm の普通の抗張試験片の形とし、之を前記の組合せで 5 枚重ね、掴みの部分を半田付けした。これを抗張試験すれば第 7 圖線圖 1 のやうな荷重-伸曲線を得た。その切斷後の試片を同圖寫眞 1 に示す。

此の場合、硬板が強過ぎて、且、その伸びが大きかつたため、實際の踊場とは餘り似たものが生じなかつたが、その機構は想像される。

2) 銅線を用ひた模型 板の代りに線を用ひ、硬線には硬引線及び焼入鋼線を用ひた。その太さ及び力學的性質は次のやうである。

第 11 表

	焼鈍線	硬引線	焼入鋼線
直徑 (mm)	0.80	0.45	0.30
抗張力 (kg)	26	14	22
伸び (%)	20	1.4	0.2

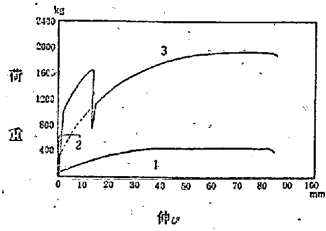
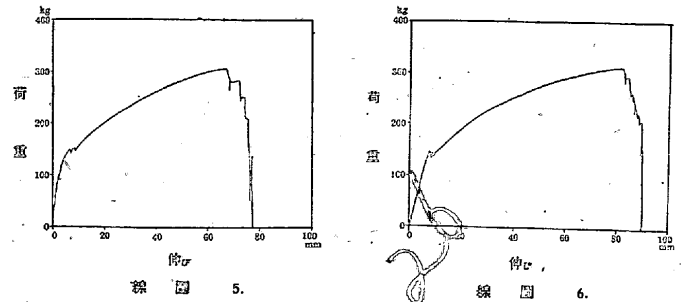
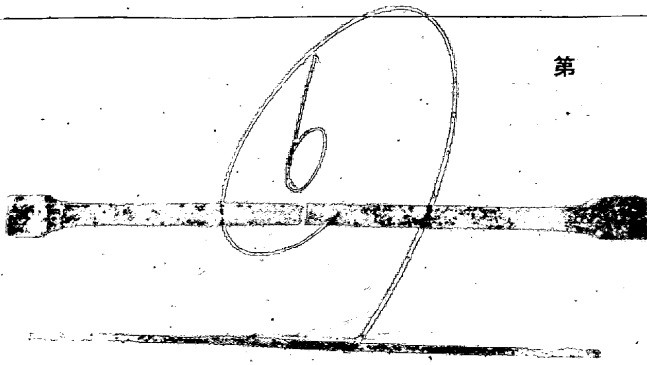
抗張力は 1 本の強さである。

かゝる性質の線金を焼鈍線 30 本に對し、夫々硬引線、1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 本及び焼入鋼線 3, 6, 10 本を加へて、10 種の模型を作た。全長 35cm とし、兩端 5cm づつを半田付とし、31~50 本で一束とした。

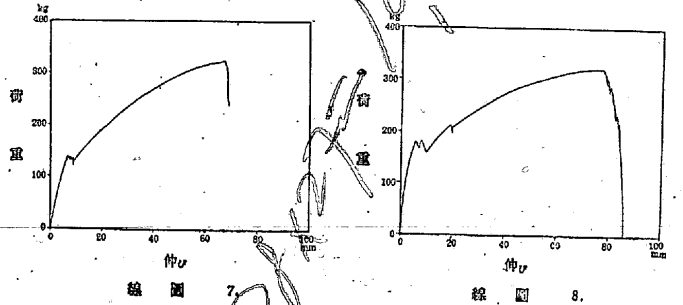
標點距離 20cm の Amsler 式自記測伸計をつけて、Amsler 2 ton 線金試験機で抗張試験を行た。銅線 30 本、鋼線 3 本一束の模型の切斷後の形を第 7 圖寫眞 1 に示す。荷重-伸曲線を自記せしめたものは同線圖 2~12 に示す通りである、何れも踊場を有し、特に線圖 5, 6, 8 及び 12 は上部及び下部の降伏點まで示してゐる。

製作上、各線の長さを絶対に等しくすることは出來ないので、硬線は一本づゝきれていつて本數が増しても、下部降伏點の値は上らない。唯、踊場にぎざぎざが段々と多くなり、踊場が長くなつた丈である。最初の 2, 3 本が殆ど同時に切れたため、上部降伏點のやうなものが生じたものもある。即ち、此の 2, 3 本の切斷した時の強さは、各の強さの幾分重たものとなつたが、後のものは多く 1 本づゝ切れたため、下部降伏點のやうな低い値を示した。

第 7 圖

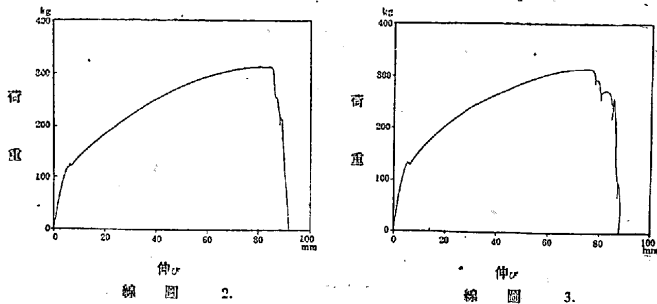


線圖 1. 實驗 1. 鋼板



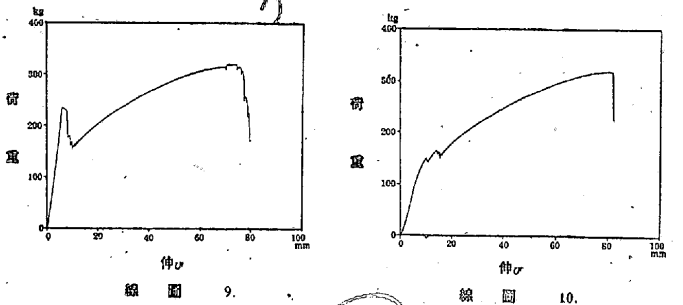
線圖 7.

線圖 8.



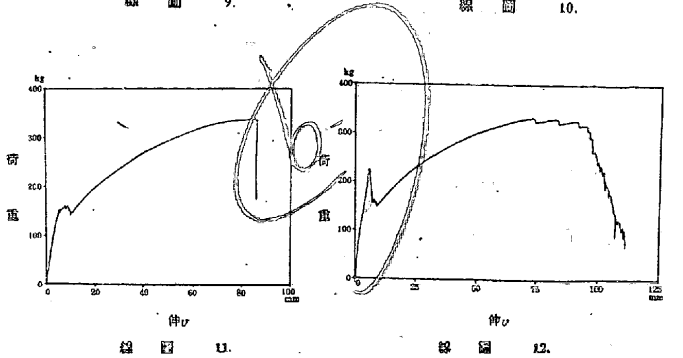
線圖 2.

線圖 3.



線圖 9.

線圖 10.



線圖 11.

線圖 12.

2. 結果の吟味 上の實驗の結果を數量的に吟味してみる。

焼鈍線と硬線との應力-變形の比を K_a, K_c とし、一束の本數を N_a, N_c 、一本の抗張力を σ_a, σ_c 、伸びを ϵ_a, ϵ_c としてをく。

上の模型で總べての線を一樣の長さに、互にたるみがないやうに半田付けして試験機の掴みに衝へさせることは實驗に於いて甚だ困難である。互の線の間にも多少の長短が出來、たるみが出来勝ちである。そのたるみの大きさは、硬引線の伸びに對しては見逃せないが、焼鈍線の全體の伸びに對しては餘り大きくないから省略してもよい。

今、標點距離 l をもつ最短の硬線に對して、他の硬線のたるんである量を $\delta l_1, \delta l_2, \delta l_3, \dots, \delta l_{nc-1}$ とし、焼鈍線のたるみを δl_n とし、

$$\delta l_1 < \delta l_2 < \delta l_3 \dots < \delta l_{nc-1}$$

としておく。

荷重をかけていつて最短の硬線がその最大の伸び ϵ_c に達した時の全荷重を W_1 とすれば、 W_1 は此の硬線の最大強度 σ_c と、残りの硬線が伸び $l\epsilon_c$ に對して分擔して

る荷重 W_c と、焼鈍線が同じく伸び $l\epsilon_c$ に對して分擔してゐる荷重 W_a との和である。

$$\text{即ち, } W_1 = \sigma_c + W_{c1} + W_{a1}$$

然るに硬線の變形としての眞の伸びは $\epsilon_c l - \delta l_1, \epsilon_c l - \delta l_2, \dots, \epsilon_c l - \delta l_{nc-1}$ であるから、

$$W_{c1} = k_c \left\{ \frac{\epsilon_c l - \delta l_1}{l + \delta l_1} \right\} + k_c \left\{ \frac{\epsilon_c l - \delta l_2}{l + \delta l_2} \right\} + \dots + k_c \left\{ \frac{\epsilon_c l - \delta l_{nc-1}}{l + \delta l_{nc-1}} \right\}$$

但、負の項は捨てる (以下之に準ずる)。 k_c は硬線の應力-變形の比である。

硬線であるから切斷に到るまで伸びの如何なる程度によらず、 k_c を不變と見、 l に對して $l + \delta l_{cm}$ を l と見做し、 $\delta l_m / l$ を δ_{em} で表せば、

$$W_{e1} = k_c \left\{ (\epsilon_c - \delta\epsilon_1) + (\epsilon_c - \delta\epsilon_2) + \dots + (\epsilon_c - \delta\epsilon_{n-1}) \right\}$$

$$= k_c \left\{ (n-1)\epsilon_c - \sum_1^{n-1} \delta\epsilon_m \right\}$$

又、 $\delta l_n/l = \delta\epsilon_n$ 、軟線の應力變形の比を k_a で表せば

$$W_{a1} = n_a k_{a1} (\epsilon_c - \delta\epsilon_n)$$

依て

$$W_1 = \sigma_c + k_c \left\{ (n-1)\epsilon_c - \sum_1^{n-1} \delta\epsilon_m \right\} + n_a k_{a1} (\epsilon_c - \delta\epsilon_n)$$

硬線 1 本が切斷すればその時の荷重は

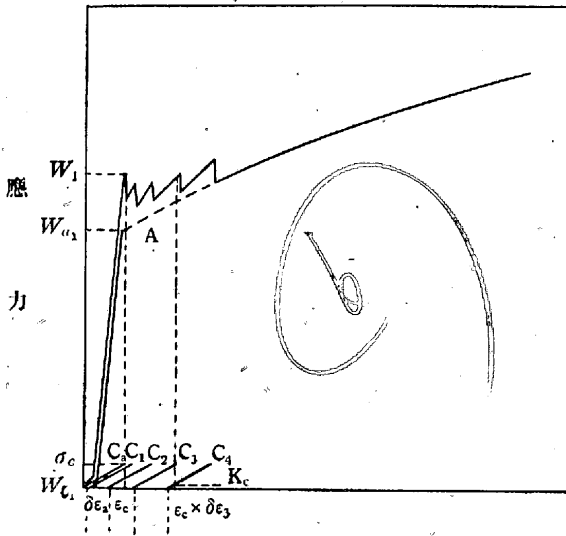
$$W_1' = W_1 - \sigma_c = k_c \left\{ (n-1)\epsilon_c - \sum_1^{n-1} \delta\epsilon_m \right\} + n_a k_{a1} (\epsilon_c - \delta\epsilon_n)$$

となる。

これを圖示すれば第 8 圖のやうになる。

A は軟線の應力—變形曲線で、C は硬線のを表はす。たるみ及び伸びは標點距離 l で割った比で表はす。上述のや

第 8 圖



うに軟線にはたるみ $\delta\epsilon_n$ 、硬線はそれぞれたるみを最短のものに對して、 $\delta\epsilon_1, \delta\epsilon_2, \delta\epsilon_3, \dots$ を有す。最短の硬線 C の最大伸び ϵ_c と等しい伸びによつて生じる應力は軟線では $k_{a1}(\epsilon_c - \delta\epsilon_n)$ 、硬線 C₁ では $k_c(\epsilon_c - \delta\epsilon_1)$ 、C₂ では $k_c(\epsilon_c - \delta\epsilon_2) \dots$ である。よつて ϵ_c の伸びによつて生じる綜合應力 σ_1 は之等の和である。圖では軟線個々のたるみを省略し、 K_{a1} で n_a 本全體として應力—變形の比を表しておく。即ち、

$$K_{a1} = n_a k_{a1}$$

第 2 本目の硬線の切斷前の荷重は

$$W_2 = \sigma_c + k_c \left\{ (n-2)(\epsilon_c + \delta\epsilon_1) - \sum_2^{n-1} \delta\epsilon_m \right\} + K_{a2}(\epsilon_c + \delta\epsilon_1 - \delta\epsilon_n)$$

第 m 本目の硬線の切斷前の荷重は

$$W_m = \sigma_c + k_c \left\{ (n-m-1)(\epsilon_c + \delta\epsilon_m) - \sum_{m+1}^{n-1} \delta\epsilon_m \right\} + K_{am}(\epsilon_c + \delta\epsilon_m - \delta\epsilon_n)$$

最後の 1 本の硬線が切斷する前の荷重は

$$W_{n-1} = \sigma_c + k_a \{ \epsilon_c + \delta\epsilon_{n-1} - \delta\epsilon_n \}$$

となり最後の 1 本が切れれば、荷重は焼鈍線で堪えなくてはならない。その 1 本が切れる前の荷重に堪えるためには次の量だけ變形しなくてはならない。

$$\delta l = (\epsilon_c + \delta\epsilon_{n-1} - \delta\epsilon_n + \frac{k_c \epsilon_c}{k_{anc}}) l$$

とならなくてはならない。即ち、之が踊場に於ける伸びの全長に相當する量である。

δl は模型製作の際に生ずるたるみであるから、その影響を吟味してみる。

$$(1) \delta l_1 = \delta l_2 = \dots = \delta l_{n-1} = \delta l_n = 0$$

總べての線金にたるみがない場合である。1 本の硬線が切斷しようとする前の荷重は

$$W_1 = \sigma_c + k_c(n-1)\epsilon_c + n_a k_a \epsilon_c$$

であるが $k_c \epsilon_c = \sigma_c$ 、 $k_a n_a = K_a$ であるから

$$W_1 = n_c \sigma_c + K_a \epsilon_c$$

となつて全部の硬線に一樣に荷重がかゝつて直に硬線全部は切斷し、ために、焼鈍線は全荷重を受け

$$\delta l = \frac{k_c \epsilon_c l n_c}{K_a} = \frac{\sigma_c n_c l}{K_a}$$

だけ伸びなくてはならない。

つまり模型實驗(1)に相當するもので、實際の場合は、Lüders 縞 1 本の時に似てをる。第 II 章 2 で説明したやうに境界組織應力 σ_{b2} で切斷し、その時の地鐵の受けた荷重は σ_{f2} から、 σ_y に移る。そして地鐵の伸びは ϵ_2 から ϵ_y となる、此の場合と比較すれば

$$\sigma_{b2} = n \sigma_c, \quad \sigma_{f2} = n_a k_a \epsilon_c, \quad \sigma_y = n \sigma_c + n_a k_a \epsilon_c,$$

$$\epsilon_y - \epsilon_2 = \delta l = (\sigma_c / k_a) \cdot (n_c / n_a) \cdot l$$

に相當する。

實例として第 7 圖の模型實驗では線圖 2 の硬引線 1 本の場合に相當し、線圖 10 及び線圖 13 もこれに近いものである。又、250°C の軟鋼試験に於ける境界組織が一度に切れたやうな結果に似てをる。その荷重—伸曲線は第 7 圖線圖 1 に示したやうに第一不連続群は唯一の不連続よりもたずして、曲線の形は模型の場合の第 7 圖線圖 2 とよく似てをる

$$(2) \delta l_2 - \delta l_1 = \epsilon l_3 - \delta l_2 = \dots - \delta l_{nc-1} - \delta l_{nc-2} = \delta l, \delta l_n = 0$$

硬線の1本1本のたるみの差が順々に等しく、焼鈍線は最短の硬線と等しい長さで、少しもたるんでゐない場合である。

上の條件は

$$\delta l_1 = \delta l, \quad \delta l_2 = 2\delta l, \dots, \delta l_n = n\delta l,$$

$$\delta \epsilon_1 = \delta \epsilon, \quad \delta \epsilon_2 = 2\delta \epsilon, \dots, \delta \epsilon_n = n\delta \epsilon$$

と書いてもよい。よつて m 番目の硬線が將に切斷しやうとする時は、荷重は次のやうになつてゐる筈である。

$$W_m = \sigma_c + k_c \{ (\epsilon_c + m\delta \epsilon - m + 1) \cdot \delta \epsilon \} + (\epsilon_0 + m\delta \epsilon - m + 2) \cdot \delta \epsilon$$

$$+ \dots + (\epsilon_0 + m\delta \epsilon - m + n) \cdot \delta \epsilon \} + K_a (\epsilon_c + m\delta \epsilon)$$

$$= \sigma_c + k_c \{ \epsilon_c - 1\delta \epsilon + \epsilon_0 - 2\delta \epsilon + \dots + \epsilon_0 - n\delta \epsilon \} + k_a (\epsilon_c + m\delta \epsilon)$$

n は各項が正の間だけの正の整数である。 n が硬線の全數 n_0 より小さい間はたるんでゐる硬線があるわけで、更に伸びが加つて硬線が1本切れても、又、補充の硬線が1本加つて行く。そして常に W_m は同じ形をとつて n が n_0 に達すれば、それ以後は k_c の係数の項が一つづつ減じてゆく。そして n は零に近づいて遂になくなってしまふ。即ち、硬線は1本づつ切れていっても始めの間は切れただけ補充されるが、ある點から補充がなくなって等しい W_0 を保つためには、 k_a の項が増してゆく、そして k_c の項がなくなつたときの δl_a が踊場の長さとなるのである。

此のやうな規則正しいたるみを作ることはかなり困難であるが、それに近い例は第7圖線圖5~7の硬引線2~4本を加へた時の模型實驗に於いて見られる。

常溫に於ける踊場とよく似た曲線を示す。しかし、之は嚴密にいへば Lüders 縞1本の發生の時と相似な實驗で此の(2)の例のやうな場合は常溫に於けるやうに Lüders 縞が一方からじわじわ進む場合に似てゐるのであつて、平行部全體の降伏點現象は之を縦につないだ場合である。即ち、Lüders 縞1本がかくして出終ると、隣の Lüders 縞の發生が始まるが、その時は、此の模型實驗を繰り返されるわけである。さうやつて平行部全體が數本の Lüders 縞で覆はれるやうに、模型實驗も、數回繰り返されて行はれると同様な結果を示す。

かくの如く、脆いものと粘いものと同時に應力要素となつて、外力に抵抗しやうとすれば、先づ先に脆いものが切斷し、その分擔してゐた荷重は粘いものに移行する。ために、全體の荷重-變形曲線にはその移行による不連続が現はれる。その様子は本模型實驗で了解されることと思ふ。實際の蜂窩組織では本實驗に用ひたやうな模型が顯微鏡的存在としてあるから、その一つ一つの過渡的不連続によ

るぎざぎざは極めて小さく全體の集りとしては水平な直線になつてしまふ。それが前述のやうに脆い方の材料の脆さが減て破壊勢力が、位置勢力として多く貯へられるやうになれば、模型實驗の條件(1)のやうに全體の組織が一度に破れるまで保たれるので不連続も大きく一度に現はれることになる。

即ち、青脆溫度に於ける抗張試驗の結果を示すこととなる。更に硬線が軟かくなれば、過渡現象は無くなり、硬線も終りまで切れずに軟線と同じやうに伸びてゆく。それが即ち、青脆溫度以上の場合を示す結果となる。

かく、簡単な模型實驗によつても、脆い組織と粘い組織と、同時に應力要素として存在すれば、脆い組織が切れる時の過渡現象として降伏點現象が發生することが説明される。

結 論

前報に報告した軟鋼の降伏點に關する諸現象について發生原因を歸納的に考察し、その發生機構を蜂窩組織によつて説明を試みた。

前報に於いて實驗的に次の諸事實を認めた。即ち軟鋼の降伏點現象である應力-變形圖に於ける踊場の發生と試片の表面に於ける Lüders 縞の出現とが全く一致し共に軟鋼の組織である結晶粒の境界組織の存在によつてのみ發生し、その崩壊は降伏點現象を消滅せしめ、又、その恢復は降伏點現象を再生せしめる。境界組織の崩壊方法として焼入による境界炭化鐵の吸收、結晶粒の異常成長による境界線の消失、冷間加工による纖維化等の諸現象を用ひ、恢復には焼鈍を用ひた。

續いて降伏點現象に及ぼす溫度の影響を實驗し、青脆溫度に於いて最も活潑となり、それ以上の高溫となれば、再び衰滅してゆくことを觀察し、青脆溫度に就いては降伏點に於ける不連続以外に最大荷重に近く「第三不連続」と稱した「迂り縞」と呼ぶ肉眼的の縞の發生を伴ふ現象を認めた。これは時效合金に一般に起るものと共通なものである。

以上の實驗の結果よりして、本報告にはかゝる降伏點現象の發生機の解釋を試みた。實驗的事實は降伏點發生機構を解釋するに、軟き地鐵と脆き境界組織とよりなる不均一なる蜂窩組織を考へることを要求する。然るときはかゝる組織に外力が加はれば各要素はそれぞれ適當な分量だけ應力を分擔するであらうが外力が増すにつれ薄い境界組織

は切斷し、全應力は地鉄に移行し、ために地鉄は急激な變形を起してその應力に抵抗せざるを得なくなるであらう。全體としては同一荷重のために急激な變形が現はれることになり、境界組織の切斷及び地鉄の急激な變形は Lüders 縞として現はれる。此の過渡現象を降伏點現象として考へる。境界組織の切斷及びその切斷個所を結ぶ線に沿て生じる地鉄の變形は顯微鏡的にも認められ、裂罅と名付けた。これは、單結晶に於けると同じやうに單純な逆りや双晶のみでは多結晶體の變形は説明出來ないものである。

尙、終りに降伏點現象の發生機構を模型を以て説明し、脆粘の二つの應力要素が同時に存在すれば、模型的にも、降伏點跡場に似た應力-變形線圖を得られることを示した。

終りに臨み、深甚な御親切と御指導を日夜賜た眞島正市先生、大學在學中より鞭撻された故後藤正治先生、並びに大河内正敏先生を始め、激勵と助言とを與へられた理化學研究所各員一辻二郎君、山口珪次君、西田正孝君、作井誠太君、福井伸二君、渡邊恒君等に深甚なる謝意を表す。

ヌベルカレドニー土鑛石よりニッケルクロム鋼直接製鋼作業に就て

(野村製鋼株式会社・千葉製鋼株式会社の印刷物より轉載)

1. 土鑛石精練の沿革 當社の傍系会社たるヌベルカレドニー鑛業会社は佛領ヌーカレドニアに含ニッケル褐鐵鑛埋藏量數百億噸に達する豊富なる鑛區を所有し現在1ヶ年拾數萬噸を本邦に供給せる現況に鑑み之が利用は本邦の如くニッケルに不足せる國に於ては焦眉の急なるを痛感し當社直系の野村理化學研究所に於て昭和14年以來電氣爐に依る直接製鋼法を研究し當工場に於て工業的にニッケルクロム鋼の製造を開始せり。本鑛石は外觀上粘土質土赤土にして Ni, Co を含有し磷分少なきを特徴とす。

平均分析下記の如し。

50.78% Fe, 0.7~1.1 Ni, 0.21 Co, 1.53 Cr, 0.20 Mn, 0.018 P, 0.31 S, 2.05 SiO₂, 10.40 Al₂O₃, 0.20 CaO, 0.71 MgO, 12.3 Ig. Loss,

2. 電氣爐直接製鋼作業の概要 本鑛石は 25~30% Moist. を含有する故電氣爐裝入前に乾燥爐を以て約 600°C の溫度に於て灼熱し内部結晶水並に灼熱減量の大部分を除去す。

還元劑としては無煙炭、コークス、コーライトを使用す。

土鑛石、還元劑、石灰、マンガノ鑛石を充分混合して全量の半量を爐内に裝入して通電すれば除々に熔解すると共に爐内は還元反應を促進し盛にガスを發生し半ば熔解すれば殘量を逐次裝入して還元反應を進行せしむ。

作業狀態下記の如し。

裝入鑛石量 5t 出鋼量 2.3t 歩留 93%
出鋼應當り電力量 3,000~2,500 kWh 出鋼應當り電極消費量 25 kg
所要時間 5h 20mn 熔滓指數 0.25~0.35

3. 製品の試験成績 ニッケルクロム鋼塊製造に就ては土鑛石より直接に製鋼する方法と鑛石より一回粗鐵を作り其後之を再熔解電氣爐作業にて鋼塊を製造する方法とあり平均分析下記の如し。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
ニッケル粗鐵	A 0.80	0.18	0.33	0.005	0.020	2.09	0.71	0.36
クロム粗鐵	B 0.37	0.27	0.10	0.024	0.031	1.27	0.88	0.35
ニッケル製品	A 0.34	0.21	0.42	0.015	0.014	1.37	0.62	0.35
クロム鋼	B 0.412	0.31	0.398	0.005	0.024	3.04	0.312	0.411

規格外のコバルトを含有すれども機械的性質には好影響を與へるものと認められる。

機械的性質は下記の如く日本標準規格を優に凌駕する好成绩を示す。

番號	直徑 mm	標距 mm	降伏點 kg/mm ²	抗張力 kg/mm ²	伸長 %	絞率 %	シャルピー kgm/cm ²	硬度 B.H.N.
B 1	13.97	50.0	88.0	94.8	24.0	63	12.4	269
B 2	13.96	50.0	87.0	94.1	24.0	63	12.3	—

4. 結論 本ニッケルクロム鋼の直接製鋼法は尙技術的並に經濟的に研究中なれども現下の狀態に於て此の利用は最も急を要する處と認め作業を續行中なり。本土鑛石の利用にてはニッケルクロム鋼第1種を主とし第2種迄を生産すれども Ni の濃度を高くするため轉爐吹製等の方法によりニッケルクロム第4種をも生産する事可能なりと思はれる。

本法により製造されたるニッケルクロム鋼の機械的性質は他の方法により製造されたる同種鋼に比較して斷然優秀なる成績を示す事は前表に示された通りにして

a) 處女性による優秀性 b) Co 含有による優秀性 c) 原料鑛石自體が既に Ni と Fe の融合體なる爲に普通の Ni 添加による特殊鋼に比べ各原素の融合狀態極めて自然的なる事も優秀性を増す事の一因と考へられる。

等の理由と思はれる。