第 7 図

以上の図より次のごとき結果が認められた。

(1) 底部における主ひずみ ϵ_1 と ϵ_2 は大きさほとんど相等しく共に正のひずみで ϵ_3 のみ負のひずみである。したがって、この部分は板の面に沿ってほぼ一様な引張りを受けていることがわかる。

(2) 上型の絞り角上において ϵ_2 の符号が変わり、また ϵ_1 は極大値、 ϵ_3 は極小値をとる。特に点 $x=12$ $y=12$ の附近において板は最も薄くなる。したがって絞りによる破断の危険性はこの部分が最も大であると考えられる。

(3) 下型の絞り角上から外周に向って ϵ_2 は次第に減少し周方向に強い圧縮を受けているのが認められる。しかし、その絶対値は中心線上で最小、対角線上で最大である。

(4) 中心線上では下型の絞り角上から対角線上では側壁の部分から外側において ϵ_3 が正となる。したがって本実験においてはアイロニングの現象が認められた。

(5) 辺の部分と比較してすみの部分における主ひずみは常に絶対値が大である。特に絞り深さの大なる時側壁および下型の絞り角上においてこの傾向が著しい。したがって角絞りにおいて生ずるひずみは第 7 図のごとき線図によれば円筒絞り⁽⁴⁾とほぼ相等しい傾向を示すが、同一の深さにある製品上の二点の主ひずみは円筒絞りのごとく必ずしも同じ大いさを示さない。

6. 結 語

適当なブランクから絞った角絞り製品のひずみを測定して各点に生じた主ひずみの大いさと方向を知ることができた。これによって今後角絞りの塑性変形を解析するために一応の手掛りを与え得たものと思う。

注：一

(1) 昭和 25 年 4 月 8 日 第 27 期定時總會講演會において講演。

原稿受付 昭和 25 年 10 月 2 日。

(2), (3) 正員, 東京工業大學。

(4) 益田：機械學會論文集, 8 卷 32 號, I-128 ページ (昭 17-8)。

621.946.1

鋼線引抜における温度の影響⁽¹⁾

山本 明⁽²⁾ 田中 晋輔⁽³⁾ 片岡 晋一⁽⁴⁾

Temperature-Effect on the Steel Wire Drawing

by Akira YAMAMOTO, Sinsuke TANAKA and Sin'iti KATAOKA

The drawing of steel wire was carried out at various temperatures ranging from the room temperature to 600°C. This is possible, and the wire was protected from oxidation, being coated by the Perkarizing-process and drawn using especially soap or graphite, as the lubricant, which was found very good.

By the drawing temperature, deformation is divided into three zones-room temperature zone, blue brittleness temperature zone, and recrystallizing temperature zone. Mechanical properties, distribution of fibre structures, micro- and macro-structures, and distribution of residual stresses are varied at each zone, and each deformation mechanism was discussed.

Above all, mechanical properties behaves as if the one characterized at the temperature at which drawing is carried, is frozen to the room temperature.

1. 緒 言

線引された針金, 特に鋼, アルミニウム, 銅のその材料学的扱いは古くから研究されているが, おおむね常温におけるものを扱っており, 常温以上の温度で引抜加工されたものについては余り文献を見ないようである. そこで本研究は鋼線の高温での引抜を扱い, その基礎としての

i) 高温における酸化防止の方法と, 適当な潤滑剤の選定を行い

更に, 各温度で線引加工した材料について

ii) 機械的性質

iii) X 線の異方性(繊維組織)

iv) 残留応力

の変化を調べ, それぞれの変形機構を考えた.

近時, 作業能率の点などより高速多段伸線が行われるが, この場合摩擦, 変形, およびドラム上のすべりなどによって発熱を伴うが, これらの考察にも役立つことと考える.

2. 実験装置

高温で線引を行うために第1図のごとき加熱炉を試

作し, 引張試験機に装置して行った. すなわち線およびダイスを別個の炉で同温に加熱し, 線加熱炉を通過した材料が, ダイスを通るようにしてある. 線加熱炉内には肉厚 3 mm の銅管を挿入して炉内温度を均一化し, その温度は上部ではかり, また線引中特にダイス温度は綿密に恒温に調整し, この温度は合金部に埋込んだ熱電対ではかっている.

第1図 高温線引炉

試料は所定温度に炉を調整したのち, 下端の炉蓋の小穴より挿入してダイス穴を通った口付部をチャックでつかみ直ちに引抜き, 試料は一定条件の場所より採集した.

引抜速度は 50 mm/mn で炉中時間は 3 分 (=150

mm/50 mm) なるゆえ, 始め炉外にある部分でもダイスを通るときには十分熱的平衡に達している. なお試料は 0.56% C, 5.6 mmφ, および 0.12% C, 1.48 mmφ の鋼線を用い, 主として後者について行った.

3. 実験結果および考察

3.1 高温における酸化防止の実験 再結晶温度附近の温度にまでおよぶため, 材料の酸化を防ぐことが必要で, これも工業的に操作容易でかつ潤滑の役割りすなわち変形を容易にする性質をもったものであれば更によく, この目的にそうと考えられる被膜の中より銅めっき および Perkarize 法によるりん酸塩被膜を用うことにした. そこで上記表面処理をした鋼線お

第2図 酸化膜発生の温度と時間

2図のように変化する. この場合, 酸化膜はその厚さにしたがう干渉色より黒色へと移行するが, 銅, 鋼のそれが剥脱性で硬く, 線引後の表面を荒らすに対してりん酸塩被膜は密着性で十分この使用温度に耐え, 加工後も防錆的役割をなし 600°C で引いたものも十分な光沢面をもっている.

3.2 潤滑被膜としての銅およびりん酸塩被膜

ダイス壁における摩擦力が引抜線の引張強さより大るときは切断を生ずる. このために

i) 通常線引に用いられる潤滑剤が高温で使用できるや否や

ii) しからざれば他の適当なる潤滑剤

iii) 酸化防止膜の潤滑性能

を見出すことが必要である.

A. 潤滑被膜としての銅およびりん酸塩被膜

この性能を見るために, 常温で潤滑油を用いないで引張試験機で引抜き, あわせて目的にそう適当な被膜厚さを決定した. この材料は 0.65% C で, 焼なまししないで加工されたままのものを用い, 硬化の影響を少くした. その結果は第1表で, 比較のため酸洗材に石けんを用いて引抜いた結果も附記してある. この表で引抜力が各工程で異なるのは,

(a) ダイスの形, 摩擦長さ, 引抜率(断面縮小率)の

第 1 表

工程	線 径 mm	引 抜 率 (原線に対する, および各工程の) %	単位引抜面積に対する引抜力 kg/mm^2							
			被覆なし 銅めっき		りん酸塩被覆処理時間, 潤滑なし					
			石けん	潤滑なし	1' 15"	2' 30"	5'	10'	20'	40'
1	5.2	16.0	395	550	485	500	540	561	570	588
2	4.7	29.6 (18.3)	326	356	385	347	334	341	320	328
3	4.25	42.5 (18.2)	337	372	*	395	362	375	353	356
4	4.0	49.0 (11.4)	370	450	...	473	456	425	425	425
5	3.7	56.4 (14.3)	366	412	...	...	406	406	390	390

引抜温度 25°C, 引抜速度 50 mm/min

注: 1. 原線: 0.65 %C, 加工材, 5.6+f mm

2. f: 被膜厚さ 銅めっき 1/100 mm, りん酸塩被膜(処理20分) 1.2/100 mm

3. *: 被膜消失 4. キゲタロイダイス W-5 および4型直線ダイス 14°

変化, (b) 硬化の影響, (c) 試料の大きさ (size effect) などによるので, 同一条件である横の列について比較してみると

1. 第1回引抜では, りん酸塩処理時間と共に被膜厚さが増して原線の径が大となっているため, 引抜力が増加すが, 第2回以後では処理時間の長いものほど小さくなって潤滑に役立つことが示され, また りん酸塩被膜が粗鬆である第1回よりも第2回以降で優秀となり, 更に厚さがある程度以下になるとこの性能が失われることなどもわかり, 結局, 数回の引抜加工に耐え良好な潤滑性能を与えるものは処理時間 20 分厚さにして 1.2/100 mm 程度以上のものということになる. そしてこれは被膜なしに石けんを用いたときの値に近くなっている.

2. 銅被膜は等厚の りん酸塩被膜 に近いがやや劣り最小有効厚さが厚くなっている.

なお, りん酸塩結晶は比較的脆い結晶集合体 $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ で, だいたいそれ自らは潤滑剤として十分でなく, 通常強い極性群をもった高分子有機物を含む油脂および石けんを併用して用い, これが不溶性石けんとなって被膜結晶粒界に定着し, 強圧下では非晶質に近くなり個々の間ですべりを起すため摩擦が減少するといわれている⁽⁶⁾.

B. 種々の温度における潤滑剤の性能 0.12 %C, 1.48 mmφ の, a 酸洗材, b 銅被覆材, c りん酸塩被覆材の3種の原線(b, c は被膜だけ径が大きい)に一般に用いられる潤滑剤および高温で用いると考えられる材料を潤滑剤として用い, それぞれの場合の引抜力を示すと第3図のごとくである. a, b は酸化のおそれがあるので 200°C 以上では行っていない. また材料は焼なまししていない. 図において

1. 引抜力の低下および破断温度の上昇より潤滑性能がわかる.

第3図 種々の温度における潤滑剤の性能

1. 潤滑剤なし 2. 滑石 3. 硼砂
4. 石灰 5. 種油 6. 石けん 7. 黒鉛
× 破断点

0.12 %C, 1.48+f→1.375 mm, 速度 50 mm/min

2. 被膜自体の性質に応じてこれに併用される潤滑剤の働きも変化し, 特に被膜にくらべて硬度が大きく軟化温度の高いものは, たとえば埋込まれることなどによって抵抗をますと考えられ黒鉛を除いて粒状物は一般に引抜力は大で, 常温で用いられるものも一般に温度上昇と共に使用不能となっている.

3. 結局高温で使用できるのは石けんと黒鉛だけで他は温度上昇と共に摩擦を増し常温で引抜力の大きなものから順次切断している. また温度が上昇すれば石けんよりも黒鉛が優れることもみられる. 石けんは 300°C 以上とくに 400°C 以上では短時間で炭化しはじめ, このために生じた無定形微粒炭素と, 黒鉛のもつ非常にすべり易いいわゆる黒鉛格子との変形に対する差によるものと考えられる. そして黒鉛の場合の潤滑機構としては被膜と別個にいずれも変形しやすいものとして働くこと

が想像される。

以上により高温引抜には処理時間約 20 分のりん酸塩被膜に黒鉛を使用すればよいことがわかった。

3・3 引抜温度と機械的性質の変化 真空炉で 900°C に 30 分加熱焼ならした 0.12 %C の鋼線を 25°C ないし 600°C の範囲の温度で第 2 表の四つの超硬合金直線ダイスを通してえられた引抜率 53 % (1.48 mmφ → 1.03 mmφ) の線の機械的性質の変化を求めた。この工程における引抜力の変化は第 4 図のようであった。これより

第 2 表 使用したダイス

工程	ダイス (シゲタロイ) D-1	穴 径 D mm	円すい 角 $2\alpha^\circ$	引 抜 率 (原線に対する) (及び各工程の) %
1	W 102	1.375	15°	15.8
2	"	1.25	14°	30.5 (17.2)
3	"	1.18	15°	38.0 (10.5)
4	"	1.03	14°	53.0 (24.0)

第 4 図 引抜力の温度による変化 2. 各工程の曲線のずれがほぼ一様であって、主として、(変形力+摩擦力)の増加が一様と考えられ、高温では変形応力、硬化性能が減退するから、摩擦力の増加は非常に著しくなっている。

3. 工程 4 の場合、200°C で 48.6 kg/mm²、600°C で 19.8 kg/mm² が引抜線に作用しており、それぞれの温度で推察される引張強さに近い値で、特に 600°C の引抜で往々切断を生ずることもうなずかれる。この塑性応力、およびダイスと線材の膨脹にもとづく線引後の直径の減少はもちろん起り μ のけたであるが 600°C では約 1.8 % にもなった。最高温度がダイス出口で、また引張応力が引張強さに近いので局部的な直径の減少が起ればただちに切断

第 5 図 機械的性質の変化
0.12 %C 焼なまし原線、黒鉛+りん酸塩被膜、53 %引抜、速度 50 mm/min

するために製品の径はほとんど一様である。

第 5 図はかくして得られた線の機械的性質を示している。この結果から状態を次の三つの領域に分けて考えることができる。

- (a) 0~100°C 常温域
- (b) 200~300°C 青脆温度域
- (c) 400~600°C 再結晶温度域 (おそらく A_1 変態点附近まで延長できよう。これは軟化速度が大という意味で、600°C のものでも X 線的に再結晶はみとめられなかった。)

それぞれあたかもこれらの温度で試験した機械的性質の変化に匹敵して来、それらの変形温度における性質の変化が常温にまで影響する結果を示している。また 25°C と 400°C で加工されたものが近似の性質を示すのは面白い。この三つの区分は後でのべる他の観察でもみられ、異なった変形様式をもつようである。200°C で硬化性能の増加と共に山を作り高温に至ってその性質が焼ならし原線に近づいているが、600°C でもやはり加工の経歴が残されていて、このばあい炉から熱の流れをもった自然空冷であるが自己焼なましは十分でなく、また多少の加工硬化の存在することもみられる。

青脆温度で引かれたものはせん断力に対し非常に弱く注意を要する。しかしこれが高速伸線で摩擦などによってこの温度になったときの性質の変化についてはあとで考察する。

3・4 引抜温度と繊維組織 多結晶金属を引抜加工するとその引抜方向に空間格子のある方向が一定方位をとるようになりいわゆる繊維組織を作る。そして体心立方である α -Fe では立方体対角線 [110] が針

金軸に、立方体面 (100) が表面に平行になる。また常温では引抜加工度の増加と共に繊維度はまし表面でよく直下で格子かく乱のため悪化し次第に内部にむかってよくなることから知られ、更に軸線と繊維軸のなす角は表面で平行に近く少しく内部に入ると大となるのち内部に入るにしたがって再び平行に近づくことが色んな研究によって知られている。そこで引抜温度の上昇によって、これらがどのように変化するかを調べてみた。そのために CoKa- X 線による干渉図形を比較することにした。使用する適当な結晶面として第3表

第3表 繊維軸 [110] に対する
集積まだら点の位置 CoKa

格子面 hkl	反射角 θ°	軸に対する 面法線の傾 ρ	まだら点の 位置 δ
(110)	26° 11'	60° 90°	56° 90°
(200)	38° 37'	45° 90°	25° 90°
(220)	61° 57'	60° 90°	0° 90°

- (220)面から反射集積点
- (110)面から反射集積点
- 全上、繊維軸が傾いた場合

第6図 X線反射図形

第7図 繊維組織の表現

する部分についてこの黒化直線上を走らせてえた (c) のようなフォトメータ曲線について、その絶対値とは厳密な関連はないが便宜上半価幅を用いて次式のように表現し、比較を行うことにした。

$$\text{繊維度} = \frac{[A - (B_1 + B_2)]}{A} \times 100 \% \quad (1)$$

$$\text{繊維軸の傾き} \quad 0 < B_1/B_2 \leq 1 \quad (2)$$

(1) 式の谷から山までの高さの半価幅 $2B_1, 2B_2$ はそれぞれデバイ輪について相等しい条件でとった弧長、すなわち半価幅の弧が中心に対して張る角に相当するもので、繊維度のますほどすなわち一定理想方位からの分散が小になるほど 100 % に近づくものである。(220) 面からの反射輪では第6図に見るごとく理想方位の場合その四分点に集積点を生ずる。厳密にいうと $\delta=0^\circ$ の位置は少しく外方にはずれている。もし引抜軸に対し繊維軸がある角を構えたと同図に示すようにこれらの点は移動し、 $\delta=0^\circ$ の集積点に相当する弧長は一方でまし他方では減ずる。そこで (2) 式のごとくして繊維軸の傾きを表わすことにした。

第8図 (220) 面における繊維組織の変化

- a. りん酸塩被膜 + 黒鉛, 引拔率 15.8 %, 引拔速度 50 mm/mn
- b. " + " , 53 %, "
- c. " + " , 15.8 %, 15 m/mn
- d. " + 石灰, " %, 50 mm/mn

このような手段によって、0.12 %C, 1.48 mmφ の焼ならし線に前述の4行程およびその第1工程のみを加えたものについて得た結果は第8図である。これより次のことが推論される。

1. 加工温度と繊維組織

黒鉛を用いて 50 mm/mn の速度で 53 % の引拔率を与えた b の場合は、表皮直下の格子かく乱部にあたる $0.75d$ の部分では、繊維度は靑脆温度で山を示してよくなり高温で再び低下するに對し、内部を代表する $0.4d$ はこれと逆に高温でよくなり、また表皮も高温で非常によくなる。また繊維軸の傾きも表皮では変化は少ないが、 $0.75d$ は靑脆温度で平行に近くなり、 $0.4d$ では高温で大きな角を構える。これをまとめて表わすと第9図のようになり、引拔温度に対してやはり三つの領域に分けて考えることができる。常温での変化はこれまでに知られた研究結果と一致しているが、靑脆温度では繊維度および繊維軸の傾きは半径

第 9 図 第 8 図 b の深さにおける分布

上でほとんど変化しない。高温では常温より大きな変化が再びみられるようになり、全体としての繊維度はよいようで、かつ内部に向かうほど軸に対して大きな角を構えるようになる。これらはもちろん、ダイス壁との摩擦および材料の性質変化によるのである。また上のようすより、高温ではこの選択方位の大部分のすべり面は軸線に対し大きな角を構えていて軸線に直角な最後的位置には到っておらず、まだ大きな変形能を残していることになり、青脆温度のものは大きな硬化性能も関係して一様ですべり面も軸線にほぼ直角に近くなるまで加工されていることになる。

2. 加工度との関係 これを引拔率 15.8 % の a と比べるとだいたい同じ傾向であるが、 $0.75d$ は加工度の増加と共に格子かく乱が大になって繊維度もおち、繊維軸の傾きも軸に平行に近づくようである。そして加工度の増加に伴って繊維組織は外から内部へ向かって発達し全体として繊維度のますことがしられる。

3. 引拔速度の影響 同図 C はやはり黒鉛を用いて 15 m/mn の速度で引いたもので、 $0.75d$ におけるものを示すが、温度上昇と共に繊維度は上昇し、繊維軸の傾きは 300°C で最小となり、低速引拔の状態が高温側にずれたように見え、また内部での変化もこれに似てくる。Manjoine は色んな温度で高速衝撃引張を行って低温性質が高速になると高温側にずれる⁽⁹⁾ことを示しており、また高速になると変形応力が上昇すると共に硬化性能が減少して理想的流れ曲線に近ずき粘性的変形のようになる⁽⁷⁾ことも知られていて、特に $0.75d$ の繊維度の高温における上昇や 600°C における切断による引拔不能などより、これと同様なことが起っていると考えられる。そこで高速伸線で青脆温度に突入しても得られた線の性質はそれより低温の低速加工のものに近いと思われる。

4. 潤滑剤の影響 黒鉛の代りに石灰を利用すると前述のごとく高温で潤滑性能が減じ引拔力がましてくる。この時の状態が d で、摩擦のため表皮での変形がひどくなっている。

5. 機械的性質との関係

繊維組織をとるときその結晶格子の齊一化によって、当然機械的外力に対する変形の対応度が異なることが、考えられるが、Wassermann は繊維組織の相違が、直接に機械的性質に決定的影響を与えるものではない⁽⁸⁾ことを見出している。もちろんこれは組織などでマスクされるのであるが、しかし 1. で述べたように青脆温度で選択方位のすべり面が最後に近い位置をとってかつこれが断面でほとんど一様であり、高温ではまだ変形能を残していることは、前者において引張強さが大で破断伸びが少く、後者において大きな破断伸びがみられることにも関連がありそうである。もちろん、高温での変形は硬化も少く自己焼なましの効果もある。しかし自己焼なましはよい繊維度を乱すに至っていないし、ひずみ 検出度の少い低角反射(110)面の輪にも再結晶の出現はみられなかった。引拔力の大きな場合引拔線に大きな塑性応力が働き引張りによる繊維度の上昇が与えられるが、特にこの組織が引拔組織と一致するから、その責任は求めがたく青脆温度の均一分布は問題になりそうである。

3.5 引拔温度と残留応力 針金の内部応力は多く腐食変形法で測られるが、X 線を用いて測定を行った。これは前者よりも精密に測れるが、表皮応力に限られるため腐食により外皮を除いたばあい新しく平衡状態をとった新生表皮のそれを測定するため実際から変移したものを見る恐れがある。また格子かく乱による線の拡がりおよび三次元応力の存在も考えられるので、比較物質として Al を使い、 $\text{CoK}\alpha_1$ による(310)面からの反射線の動きをマイクロフォトメータ曲線より測定し、その格子定数の変化を残留主応力 σ として一方的に表わすことにした。一般に繊維組織を作るためと、格子ひずみの存在および試料の小径のため反射強度は微弱で多大の露出時間を要した。前記の 0.12% C, 引拔率 53 % の線材について、 $0.9d$, $0.75d$, $0.5d$ の処で

第 10 図 残留応力の変化

求めた結果は第 10 図である。これを深さに対する分布で示すと第 11 図で、三つの点を適当に一般に知られた概念にしたがってむすんだも

第 11 図 第 10 図の梁さにおける分布

のであるが、やはり三つの領域に分けることができ、その分布をことにしている。すなわち

1. 靑脆温度では引張応力が表皮にうすく存在し圧縮応力は内部で複雑そうである。これに対して、常温、特に 600°C のものは引張応力の分布が深くなっている。

2. やはりこれら残留応力は高温の場合、空冷による熱応力の影響もあるがそれぞれの温度におけるダイス壁との摩擦および材料の性質に基づく変形状態によるものであって、前のことも考え合せて変形機構として靑脆温度では外周の摩擦に抗して、硬化性能によって内部が一体となってさやからぬけるように変形し、高温では大きな摩擦に抗し粘性的に内部ほど大きく変形するという概念がえられる。

3. また靑脆温度では抗張力が大きく、その残留応力分布の傾斜も大きいからその表皮応力も大きいことが想像され、また前節の 1. にのべたように、表皮の大部分は変形能をほとんど残していないので、このためにねじり回数が低下するのでないかと思われる。逆張力を加えて線引される場合、当然摩擦力は減少するからその表皮応力の減少も繊維組織の改善も考えられ、ねじり回数の上昇も期待できよう。

3・6 引抜温度と顕微鏡組織の変化 0.12 %C 引抜率 53 % の材料の顕微鏡写真より次のことが認められた。

1. 表面近辺すなわちダイス接触部分の変形は高温ほど大きい。

2. 結晶粒の流れは高温で大で靑脆温度で少く破砕の見られる处もあり、その大きな流れの部分は靑脆温度で表面に近ずき、温度上昇と共にまた中心部に向かって移動する。中心部の変形は非常に少い。

肉眼組織においても、全く同じような大きな流れの部分の移動が明瞭にみられ、前節で考えた変形機構の概念が裏付けられた。

4. 結 語

以上の結果を総括してみると、

1. 高温引抜を行うときには、りん酸塩被膜を施したものに石けんまたは黒鉛を潤滑剤として使用すれば酸化防止と潤滑が行え、これによって 600°C までの引抜を行った。

2. 引抜温度によって常温域、靑脆温度域、再結晶温度域の三つに大別でき、それぞれの領域において、機械的性質、繊維組織の分布、残留応力分布、顕微鏡組織は特徴のある変化をしている。

3. これらはそれぞれの温度における機械的性質と摩擦との関係で支配されるもので、引抜線の機械的性質も高温性質に非常に類似している。

4. 引抜条件もまた大きな影響を与える。

注：一

(1) 昭和 25 年 6 月 10 日 神戸地方講演会において講演。

原稿受付 昭和 25 年 10 月 16 日。

(2) 正員、神戸大学工学部。

(3) 大阪大学工学部。

(4) 正員、神戸製鋼所。

(5) 永井、マシナリー、13 巻 3 号、218 ページ (昭 25-3)。

(6) M. Manjoine and A. Nadai: Proc. A.S.T.M., **40**, 822 (1940)。

(7) M. Manjoine: Trans. A.S.M.E., **66** A-211-218 (1944)。

(8) Schmid, Wassermann: Z. f. Tech. Phys. 9, S.107 (1928)。