論文

高炭素鋼線の極低温・均一変形伸線のための
潤滑剤の検討

堀 忠邦* 佐々木 淳志** 宇都宮 裕***

Lubricant for Cryogenic Uniform-Deformation Drawing
of High-Carbon Steel Wire

Tadakuni HORI*, Atsushi SASAKI** and Hiroshi UTSUNOMIYA ***

(Received on January 26, 2015)

Recently, interest in global environment has been increasing. Demands for improved structural components and lightweight parts are increasing. It is further necessary to increase the strength of high-carbon steel wires. Delamination is a critical problem of high-strength steel wire. A major factor in the delamination is strain aging by the heat generated during wire drawing. Therefore, cryogenic drawing is effective for avoiding strain aging. In this study, the heat generated during wire drawing is focused on, and the drawing force in cryogenic drawing with various types of lubricants, i.e., liquid or powder lubricants, is discussed. Cryogenic drawing was realized by holding the wire in a box filled with liquid nitrogen prior to drawing, and the drawing force was measured using a load cell. An appropriate lubricant in cryogenic drawing was found to be powder lubricant.

Key words: high-carbon steel wire, cryogenic drawing, high strength, lubricant, drawing force.

1. 緒 言

近年の地球環境問題に対する関心の高まりにより、構造部材や部品の軽量化・省エネルギー化への要求が高まっている。鋼線を高強度化することは、使用する鋼線の細径化、軽量化・省エネルギー化につながる。

しかし、伸線加工により高強度化を実現する場合、延性・靱性の低下が問題となる。その主因として、伸線加工時の発熱によるひずみ時効^{1)~4)}が挙げられる。このひずみ時効の抑制を図るため筆者らは、前報⁵⁾で極低温で均一変形伸線を行うことで、加工中の到達温度を低温に維持できれば、延性の低下が抑制され、高炭素鋼線の高強度化を図ることが可能であると示した。ここで、均一変形伸線とはダイス半角を小さくするとともに、断面減少率を大きくし1パス当たりの形状比を大きくした伸線方法である。具体的には、一般的な伸線では1パス当たり20~30%の断面減少率でダイス半角が6°程度であるのに対して、均一変形伸線は、

40%程度の断面減少率でダイス半角4°程度のダイスを用いて伸線を行う手法である。すなわち、形状比を大きくした加工で均一変形を実現している。しかし、加工発熱が大きくなるので極低温伸線で時効を抑制している。前報⁵⁾での極低温・均一変形伸線では、一般的な粉末潤滑剤を使用した。しかしながら、粉末潤滑剤が極低温伸線において適切であるかの考察を行っていない。伸線加工において、ダイスと鋼線の間の界面における摩擦は温度上昇の重要な因子である。ダイスと鋼線の間に生じる摩擦を低減させ、摩擦発熱を低減させることができれば更なる高強度化につながると考えられる。従って、極低温・均一変形伸線における潤滑剤の検討は鋼線の高強度化に対して重要であると考えられる。

ところで、過去の極低温伸線の研究では、冷却した鋼線が大気中にさらされた際に、大気中の水分が細針状の氷となって綿状に鋼線表面に付着し摩擦抵抗を減少させると報告されている⁶⁾。そして、石鹸あるいは二硫化モリブデンなどの固体潤滑剤を付着させるとさらに摩擦係数を低下させるとも報告されている⁶⁾。しかしながら、その機構などについて詳細な検討は見あたらない。

本研究では粉末潤滑剤、液体潤滑剤および無潤滑(氷潤滑)を用いて極低温・均一変形伸線を行い、その際の引抜き力およびダイス出入り口の線温を測定した。引抜き力から

* 神鋼鋼線工業(株) 技術部 〒660-0091 尼崎市中浜町 10-1
Technical Department, Shinko wire Co., Ltd.

10-1, Nakahama-cho, Amagasaki, Hyogo, 660-0091, Japan.

** 神鋼鋼線工業(株) 開発本部 〒660-0091 尼崎市中浜町 10-1
Development Department, Shinko wire Co., Ltd.

10-1, Nakahama-cho, Amagasaki, Hyogo, 660-0091, Japan.

*** 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1
Graduate School of Engineering Osaka University
2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan.

摩擦係数を算出し、潤滑性の検討を行った。

2. 試験方法

2.1 実験方法

供試材には JIS G 3506 に規定されている硬鋼線材 SWRH82B, 線径 8.0mm を使用した。供試材の化学成分を **Table 1** に示す。この供試材を鉛浴パテンティング処理し、微細パーライト組織を得た。その後、供試材の表層酸化皮膜(スケール)を除去し、リン酸亜鉛被膜処理を施した後に **Fig. 1** に示す実験装置で液体窒素を用い伸線前材料を -120°C まで冷却したのちに線速 15m/min で伸線加工を行った。伸線加工に用いる潤滑剤は、カルシウム系の粉末潤滑剤、エマルジョン型液体潤滑剤および無潤滑(水潤滑)の 3 種類である。それ以外の実験条件については **Table 2** に示す通りとした。**Fig. 2** に示すようにダイスボックスにロードセルを設置し、引抜き力を連続的に測定した。ここで、ダイス入口の線温が変化した場合、変形抵抗が変化し、その結果、引抜き力に影響を及ぼすため、入線温度を接触温度計(安立計器株式会社製 HD-1200E)で測定し、線温が一定 (-80°C) になるように冷却槽からの距離で調整を行った。なお、ダイス手前で潤滑剤に接触することによる温度上昇についても考慮した。同時にダイス出口温度もダイスより 50mm 下流の位置で接触温度計を用いて測定した。

2.2 評価方法

引抜き力、伸線後の線温度および摩擦係数による評価を行った。過去の研究において、引抜き力の算出は様々な提案がなされているが、一般的には全仕事量: W は、理想変形仕事: W_N , 摩擦仕事: W_R , せん断仕事: W_S とすると、

$$W = W_N + W_R + W_S$$

で表される⁷⁾。伸線の条件が同じであれば、理想変形仕事、せん断仕事が一一定となるため、引抜き力で摩擦仕事の評価が可能である。また、伸線加工時の発熱は、ダイスおよび潤滑剤との接触による加熱や大気の影響を無視すると、(伸線加工による発熱) = (変形による発熱) + (摩擦による発熱) と考えられるため、伸線加工後の温度で評価が可能であると考えられる。

測定した引抜き力から摩擦係数を算出した。計算式には一般に摩擦係数の算出に用いられる Siebel の式(1)⁸⁾で算出した。

$$\mu = \alpha \left(\frac{\frac{P_z}{A_1 \bar{Y}} - \frac{2}{3} \alpha}{\ln \frac{A_0}{A_1}} - 1 \right) \quad (1)$$

ここに、 P_z : 引抜き力, $\bar{Y}$: 線材の平均降伏応力でダイス入口出口の温度における降伏応力の平均値とする、 μ : 摩擦係数, α : ダイス半角(radian), A_0 : 変形前の断面積, A_1 : 変形後の断面積とする。

Table 1 Chemical composition of the specimen (mass%)

C	Si	Mn	P	S
0.83	0.24	0.71	0.008	0.012

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental device

Table 2 Experimental conditions

No.	Drawing method	Lubricant	Temperature of wire before drawing / $^{\circ}\text{C}$	Die half angle / $^{\circ}$	Pass Schedule /mm
1	Cryogenic drawing + Uniform deformation	Calcium-based powder lubricant	-80	4	8.00 → 6.22
2		liquid lubricant			
3		No lubricant			
4	Cryogenic drawing + Normal	Calcium-based powder lubricant		6	8.00 → 7.10
5		liquid lubricant			
6		No lubricant

Fig. 2 Die box

3. 実験結果

3.1 引抜き力

極低温・均一変形伸線(実験 No.1~3)における引抜き力の測定結果を **Fig. 3** に、極低温・通常変形伸線(実験 No.4~6)における引抜き力の測定結果を **Fig. 4** に示す。参考として、常温・均一変形伸線における引抜き力の測定結果を **Fig. 5** に示す。極低温・均一変形伸線において、粉末潤滑剤を使

用して伸線加工を行った場合(実験 No.1)には、引抜き力は 28kN 程度で大きな変動もなく安定した。しかしながら、液体潤滑剤および無潤滑(氷潤滑)の場合(実験 No.2, 3)には、伸線開始より数十秒で引抜き力が急激に増加し、その値が供試材の破断荷重近くにまで上昇したため実験を中止した。

次に、極低温・通常変形伸線において、粉末潤滑剤を使用して伸線加工を行った場合(実験 No.4)、引抜き力は 23kN 程度で大きな変動もなく安定した。液体潤滑剤を使用した場合(実験 No.5)、極低温・均一変形伸線の場合とは異なり、初めの数十秒間は引抜き力 28kN 程度で安定したが、時間の経過に伴い、びびりが発生し引抜き力が安定しなかった。また、無潤滑(氷潤滑)(実験 No.6)についても液体潤滑剤使用時と同様に、引抜き開始よりびびりが発生し引抜き力が安定しなかった。

なお、粉末潤滑剤を用いた引抜き力について Fig. 3, Fig. 4 のいずれの結果においても、伸線開始後 40s 程度経過したところで引抜き力の上昇が確認された。この結果については実験開始時は冷却槽からダイスボックスまでの間は供試材が常温であり、変形抵抗が極低温の場合より小さかったために引抜き力が低下していたと考えられる。Fig. 3 の初期の引抜き力が 25kN であることは、常温・均一変形伸線における引抜き力 25kN と対応している(Fig. 5)。

3.2 線温度

線温度測定結果を Table 3 に示す。また、線温度については、引抜き応力の算出式において、純粋な線ひずみおよび材料の塑性的流れの方向変化の際の全仕事と、ダイス面と線との摩擦仕事の $m(m<1)$ 倍が製品の温度上昇に寄与すると仮定すると、引抜き直後の線の平均温度 t_1 は式(2)で予測できるとされている⁹⁾。なお、引抜き時の線温度(-80℃)で引張試験を実施し、降伏応力を測定し、この降伏応力から式(3)で平均変形抵抗(Y_m)を算出した。

$$t_1 = t_0 + \frac{1}{\rho c} \left\{ \left(Y_m \left(\frac{A_0}{A_1} - 1 \right) \left(1 + \frac{m\mu}{\alpha} \right) + 0.77 \bar{Y} \cdot \alpha \right) \right\} \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{\bar{Y}(1-0.385\alpha)}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{A_0}{A_1} - 1 \right) \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right)} \quad (3)$$

ここに、 t_0 ：ダイス入口での線温度、 t_1 ：ダイス出口での線温度、 ρ ：線の密度、 c ：線の比熱、 Y_m ：平均変形抵抗とする。なお、 m 値については 0.85 とした。また、摩擦係数 μ については 3.3 節で算出した値を用いた。この式を用いて算出した線温度計算値についても Table 3 に示す。

極低温・均一変形伸線の液体潤滑および無潤滑(氷潤滑)の実験 No.2, 3 については引抜きが不可能であったため、線温度測定は実施していない。ダイスボックス入線温度はいずれも -80℃ 程度であった。ダイス出口温度については、極低温・均一変形伸線では加工度が大きいにもかかわらずダイス出口温度は 90~100℃ であった。極低温・通常変形伸線では粉末潤滑剤(実験 No.4)を使用した場合が、30~40℃ 程度と低い温度であった。しかしながら、実験 5, 6 の極低温・通常変形伸線で液体潤滑剤および無潤滑(氷潤滑)については断面減少率が実験 No.1 より小さいにもかかわらず

線温がいずれも 100℃ を上回る結果であり、これは予測値よりもかなり高い。

Fig. 3 Drawing force in cryogenic uniform-deformation drawing

Fig. 4 Drawing force in cryogenic normal-deformation drawing

Fig. 5 Drawing force in uniform-deformation drawing at R.T.

Table 3 Wire temperature before and after drawing, and prediction by Geleji's formula

No.	Before Drawing °C	After Drawing °C	Prediction °C
1	-80~-70	90~100	112
2		—	—
3		—	—
4		30~40	43
5		80~130	54
6		100~150	61
Cf.	R.T.	120~130	142

3.3 摩擦係数

摩擦係数算出のために使用した降伏応力の測定結果を **Table 4** に、摩擦係数の算出結果および参考値として常温で均一変形伸線を実施した際に測定した引抜き力を用いて算出した摩擦係数を **Table 5** に示す。降伏応力は常温と-80°Cを比較するとおよそ 70%程度の増加が確認された。摩擦係数については、極低温・均一変形伸線の粉末潤滑剤(実験 No.1)の摩擦係数が伸線の粉末潤滑剤(実験 No.1)の摩擦係数が 0.040 と最も小さく、極低温・通常伸線の液体潤滑剤は 0.118, 無潤滑(氷潤滑)が 0.139 と最も大きいという結果であった。なお、液体潤滑剤および無潤滑(氷潤滑)については伸線が不可能であったため算出できなかった。

Table 4 Measurement results of yield stress

Diameter /mm	Temperature °C	Yield stress /MPa
8	-80	1161
	R.T.	684
7.10	R.T.	1030

Table 5 Calculation results of friction coefficient

No.	Drawing method	Lubricant	Die half angle °	Pass schedule	Friction coefficient
1	Cryogenic drawing + Uniform deformation	Calcium-based powder lubricant	4	8.00→6.22	0.040
2		liquid lubricant			—
3		No lubricant			—
4	Cryogenic drawing + Normal	Calcium-based powder lubricant	6	8.00→7.10	0.089
5		liquid lubricant			0.118
6		No lubricant			0.139
Cf.	Drawing at R.T. + Uniform deformation	Calcium-based powder lubricant	4	8.00→6.22	0.058

4. 考 察

4.1 引抜き力

極低温・均一変形伸線においては粉末潤滑剤を使用した場合に最も引抜き力が小さくなった。液体潤滑剤および無潤滑(氷潤滑)については伸線が不可能であったため引抜き力の測定はできなかった。以上より、まず粉末潤滑剤が今回用いた潤滑剤の中では最適であると考えられる。一般的に液体潤滑剤は表面の光沢を出す場合、あるいは細径の伸線に用いられる場合が多く、太径の大減面伸線には適さないとされている。液体潤滑剤を使用した場合には、ダイス入口で **Fig. 6** に示すような潤滑剤の塊が確認された。塊を取り出すと **Fig. 7** の通りであり、冷却された線材が液体潤滑剤の中を通過する際に、線材と接触した液体潤滑剤が冷却され氷状になって付着したのちに、ダイスと接触し脱落したのと考えられる。この現象により、ダイスへの潤滑剤の持ち込みが妨げられたと考えられる。また、無潤滑(氷潤滑)についても、伸線加工ができなかったため極低温・均一変形伸線においては適さないと考えられる。

Fig. 6 Lubricant clod on die entrance **Fig. 7** Lubricant clod

過去の研究⁶⁾において、無潤滑(氷潤滑)で伸線可能であり、本研究で伸線不可能となった要因については、過去の研究では、HV が 270 以下の銅系の材料および HV180 の鉄系材料であったのに対し、本実験では HV400 程度の硬鋼線であったため変形抵抗に大きな差があり、工具面圧が高く油膜厚さが小さかったためと推測される。すなわち、油膜厚さが小さくなったために、工具と鋼線の間の摩擦係数が大きくなり引抜き力が大きくなったと考えられる。

次に、極低温・通常変形伸線においても極低温・均一変形伸線と同様に粉末潤滑剤を使用した場合に最も引抜き力が小さくなった。従って、いずれの条件でも粉末潤滑剤が最も効果的であると考えられる。液体潤滑剤および無潤滑(氷潤滑)については、いずれもびびりが発生し引抜き力が安定しなかった。びびりの原因については、液体潤滑剤の場合は極低温・均一変形伸線の場合と同様の理由でダイスへの潤滑剤の持ち込みが妨げられたためと推測する。無潤滑(氷潤滑)については、付着した氷が振動またはダイスボックスとの接触で脱落し均一な減摩効果が得られなかったためと推測される。**Fig. 8** は伸線後の線材表面の状態を見

たものである。粉末潤滑剤を用いた伸線後表面は、全面にわたり黒っぽい肌を示しているのに対し、液体潤滑剤および無潤滑(水潤滑)で伸線を行った線材表面は、所々に前処理の皮膜が脱落した部分が確認された。すなわち、粉末潤滑剤においては線材表面とダイス面は潤滑状態が良好であるのに対し、液体潤滑剤および無潤滑(水潤滑)での伸線においては、局部的に線材表面とダイス面が接触し表面の前処理皮膜が脱落して表面性状が悪化したと推測される。

Fig. 8 Surface condition after drawing

4.2 線温度

極低温・均一変形伸線の粉末潤滑剤(実験 No.1)においては、断面減少率が大きいにもかかわらず、ダイス出口の線温は時効温度(150℃)以下に保たれている。その値も計算値と同等であった。しかしながら、この測定結果については、ダイスから 50mm 下流地点での値であり、ダイス内部での線表面はさらに高温であると考えられる。有限要素法で算出された結果でも線速 10m/min で 220℃まで上昇するとされている¹⁰⁾。従って、ダイス内部での線表面温度は時効温度以上になっている可能性が考えられる。極低温・通常変形伸線の粉末潤滑剤(実験 No.4)についてもほぼ計算値と同等であった。しかしながら、極低温・通常変形伸線の液体潤滑剤および無潤滑(水潤滑)では計算値より実測値の方がかなり高くなった。これは、いずれも伸線時に発生したびびりが影響していると推測する。びびりが発生している部分は引抜き力 P_z が大きく上昇している。摩擦係数 μ の算出に使用した引抜き力は平均値であり、びびりが発生し引抜き力が大きく上昇した部分の線温が計算値より大きくなったと考えられる。また、潤滑が悪く線材とダイスが直接接触し、冷却された線材と摩擦により温度上昇したダイスとの接触によって加熱されたことも影響しているものと推測される。線材とダイスの接触については Fig. 6 から伺え

る。

4.3 摩擦係数

常温・均一変形伸線の摩擦係数は 0.058 で鋼線の一般的な摩擦係数 0.050 と近い値となった。それに対して、極低温・均一変形伸線の粉末潤滑剤(実験 No.1)で摩擦係数が 0.040 と最も小さい値となった。これについては、①極低温伸線を行っているため加工時の発熱が抑制されている。この発熱の抑制によって、潤滑剤がより適正な温度範囲で使用された。あるいは、②水潤滑+粉末潤滑剤の相互効果などが挙げられる。①については、線材の表面温度が 300～500℃前後に達することがダイス温度の測定⁴⁾などから明らかになっている。極低温伸線により、表面温度が低い状態で粉末潤滑剤のより適正な使用温度範囲で加工が行われた可能性が考えられる。②に関しては、線表面に生成した水によってダイス内への潤滑剤の持ち込みが増加したなどが考えられる。いずれにしても極低温伸線および均一変形伸線が摩擦係数の低減に作用していると考えられる。一方、極低温・通常変形伸線ではいずれの条件でも摩擦係数が一般的な値である 0.050 より大きくなった。これについては、前述とは逆に、極低温伸線を行っているため加工時の発熱が抑制されており、断面減少率が小さいため、発熱の抑制によって潤滑剤が十分に軟化しない温度範囲で使用された可能性が考えられる。

5. 結 言

本研究では、鋼材とダイスの摩擦に着目し、極低温伸線における最適な潤滑条件についての調査を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 極低温・均一変形伸線においては、今回用いた潤滑剤(粉末潤滑剤、液体潤滑剤、無潤滑)の中では粉末潤滑剤が適しており、水潤滑の効果は確認されなかった。
- (2) 極低温・均一変形伸線において、通常より形状比が大きい加工にもかかわらず、粉末潤滑剤を使用すると摩擦係数が 0.04 と鋼線とダイス間の一般的な摩擦係数である 0.05 と比較しても同等以下の低い値であった。

参 考 文 献

- 1) Yamada, Y. : Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **16**(1976), 417-426.
- 2) 山田凱朗・藤田達 : 神戸製鋼技報, **27-2**(1977), 57-60.
- 3) 藤田達・山田凱朗・川上平次郎 : 神戸製鋼技報, **23-3**(1973), 44-52.
- 4) 中村芳美・川上平次郎・藤田達・山田凱朗 : 神戸製鋼技報, **26-3**(1976), 65-69.
- 5) 堀忠邦・中野元裕・佐々木淳志・宇都宮裕 : 塑性と加工, **55-644**(2014), 863-867.
- 6) 小林勝 : 極低温金属加工, (1998), 31-36, 日刊工業新聞社.
- 7) 稲数直次 : 金属引抜, (1985), 17-19, 近代編集.
- 8) Pomp, A., Siebel, E. & Houdremont, E. : Stahl und Eisen, **49** (1929), 561-567.
- 9) Geleji, A.・五弓勇雄(訳) : 金属塑性加工の計算(下), (1965), 21, コロナ社.
- 10) 中村芳美・川上平次郎・松下富春・野口昌孝 : 塑性と加工, **19-211**(1978), 703-710.