

継目無鋼管のせん孔圧延におけるプラグの 温度と表層挙動

© 1986 ISIJ

大貫 輝*・浜渦修一*・川並高雄*²・中島浩衛*³

Surface Behavior and Temperature of Plug in Piercing of Seamless Steel Pipe

Akira OHNUKI, Shuichi HAMAIZU, Takao KAWANAMI and Kōe NAKAJIMA

Synopsis :

Prediction of tool temperature is very important to improve its life, since tool life is strongly influenced by increase in temperature of tool surface in piercing and rolling process of seamless steel pipes. The temperature of plugs under some piercing conditions of cross roll and press roll piercers was calculated. Actual temperature of plugs were measured and compared with the calculated results to confirm the validity of calculation. In addition, thin layer of actual plug surface after piercing campaign was extracted by solvent method and structure of the thin layer was observed by using an electron microscope. It was clarified that temperature of plug surface becomes over 1 200°C in piercing and that a metallic surface plugs were unsuitable for a piercer. Black scale film on plug surface showed a good protective effect against heat conduction. Temperature of a plug treated with scale film became from 700°C to 800°C in piercing. The black scale film on plug surface under piercing condition was enriched in SiO₂ and it was presumed that the surface of plug was covered with a thin layer of melted scale, namely, scale lubricant. An amorphous thin layer was confirmed on the surface of a plug after piercing campaign through observation by electron microscope and electron diffraction patterns of the extracted thin layer.

1. 緒 言

継目無鋼管のせん孔圧延工程で使用されるプラグやマンドレルなど、製管用工具類の寿命は、せん孔圧延時の諸荷重のほか、工具のうける熱負荷に大きく影響される。したがって、工具類の耐久性を向上せしめるには、工具材質の研究にあわせて、せん孔圧延中の工具の表面温度や熱応力などの熱負荷を知ることが必須である。ここでは、せん孔工程におけるプラグ工具の温度解析モデルを開発し、従来の CRP (Cross Roll Piercer) と新せん孔法の PRP (Press Roll Piercer) によるプラグの温度推定を行った。また、実機プラグの表層温度を実測し¹⁾、温度解析モデルの妥当性を確かめるとともに、CRP せん孔におけるプラグ表面の黒皮の効果と、水冷プラグの適正冷却条件を見出す検討を加えた。さらに、PRP せん孔プラグでは、その表面温度を実機プラグの表面調査から推定し、プラグの形状の差異によつて変わるすべり摩擦状態がプラグにどのような熱影響を与えるかを表層組織の変化から検討を加えた。特に、黒皮処理を施したプラグ最表面の状態を詳細に究明するため表層薄膜抽

出による電子顕微鏡観察と電子回折手法²⁾により、せん孔圧延中の工具表面の挙動を調査した。

2. せん孔圧延時のプラグ温度解析

1 250°C 前後に加熱された管材を CRP や PRP でせん孔する場合、せん孔プラグが受ける熱負荷は、非常に大きく、せん孔終了後のプラグ表面は先端から肩部にかけて赤熱された状態ででてくる。一般に、小径管材 (6 インチ径以下) のせん孔では、せん孔時間が数秒から 10 数秒かかるが、この間にプラグ先端から肩部の受ける熱負荷が特に大きく、CRP せん孔では、ゴージ部の受ける損傷が激しい³⁾。その損傷状態を Photo. 1 に示すが、1 本のせん孔によつても大きな損傷をうけることがわかり、プラグの耐久性を向上せしめるには、せん孔中のプラグ表面温度をできるだけ低め、かつ熱間強度の強い工具材質が要求される。そこで、まず、せん孔中のプラグの熱負荷を調査することとし、CRP および PRP 方式のせん孔時におけるプラグ温度解析を行った。両方式におけるプラグが受ける熱影響は、Fig. 1 のように、i) プラグと被せん孔材の接触による熱伝導、ii) 摩擦発

昭和 60 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 5 月 13 日受付 (Received May 13, 1985)

* 新日本製鉄(株)塑性加工研究センター (Material Forming Process Lab., Nippon Steel Corp., 1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*² 新日本製鉄(株)塑性加工研究センター 工博 (Material Forming Process Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)中央研究本部 工博 (Central R & D Bureau, Nippon Steel Corp.)

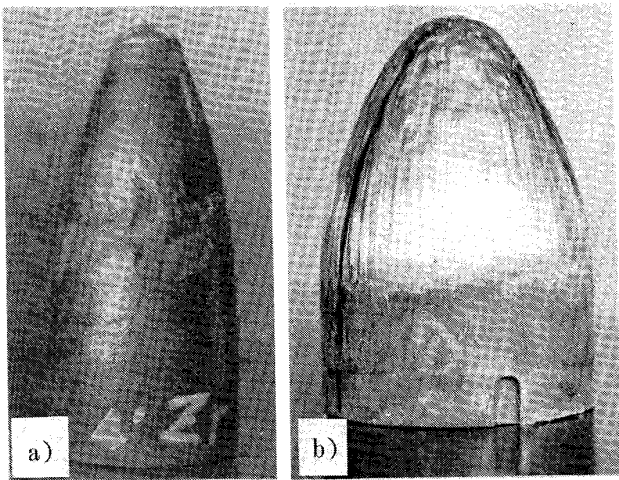


Photo. 1. External appearance of plugs after piercing of one campaign (a) : CRP, (b) : PRP).

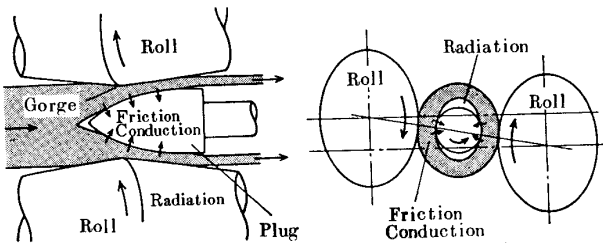


Fig. 1. Schematic view of steel piercing by cross roll piercer.

熱, iii) 非接触部での輻射 (CRP せん孔), が考えられる。これらをふまえて温度計算を行うわけであるが, ここでは, さらに次の条件を仮定し, 一次元伝熱モデルとして取り扱った。

- i) プラグを軸に直角に分割した円柱の積み重ねとする。
- ii) 軸方向の熱伝導は考えない。
- iii) プラグ周方向の温度は, 平均化して一様の分布とする。

2.1 温度解析モデル

円柱内部の比熱, 熱伝導率が等しいとすると, 円柱の一次元熱伝導方程式(1)は, 円柱の温度分布の解析解で

解くことができるが⁴⁾, せん孔圧延のような内部と表面温度差が激しい場合は数値解に頼らねばならない。Fig. 2 に, プラグの軸方向分割と, 外半径 r_a , 内半径 r_i で長さ L 中空円筒を考えた場合の半径方向の一次元的熱の流れ, さらに半径を n 個の点で分割した円柱内部の温度分布を求めるための模式図を示す。ここで一次元熱伝導方程式(1)は, 境界条件, 式(2)を考慮して差分法により近似的に解くことができる。

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} + q_f + \alpha \cdot \theta = 0 \dots\dots\dots (2)$$

まず, Fig. 2 b) から中空円筒内の r 方向の熱の流れ Q [kcal/h] は, 温度勾配 $d\theta/dr$ により,

$$Q = -\lambda \frac{d\theta}{dr} 2\pi r L \dots\dots\dots (3)$$

となる。そこで, 微小時間 $\Delta\tau$ 内で Q を一定と近似し, (3)式を積分する。ここで内外面の温度は θ_i, θ_a とする。

$$\int_{\theta_i}^{\theta_a} d\theta = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \cdot \int_{r_a}^{r_i} \frac{dr}{r} \dots\dots\dots (4)$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L}{\ln \frac{r_a}{r_i}} (\theta_i - \theta_a) \dots\dots\dots (5)$$

さらに, Fig. 2 c) から分割各点の時刻, $\tau, \tau + \Delta\tau$ における温度を $\theta_{i,\tau}, \theta_{i,\tau + \Delta\tau}$ とすると, 時刻 $\tau + \Delta\tau$ における $i-1, i, i+1$ 間の熱バランスは, (5)式から次のようになる。

$$\frac{\theta_{i-1,\tau + \Delta\tau}}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} - \left\{ \xi_i + \left(\frac{1}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} + \frac{1}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \right) \right\} \times \theta_{i,\tau + \Delta\tau} + \frac{\theta_{i+1,\tau + \Delta\tau}}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} = -\xi_i \theta_{i,\tau} \dots\dots (6)$$

ここで,

$$\xi_i = \rho \cdot C_p (\bar{r}_{i+1}^2 - \bar{r}_{i-1}^2) / 4\lambda_i \Delta\tau \dots\dots\dots (7)$$

ただし, $i=2$ から $n-1, \bar{r}_{i+1} = r_{i+1} + r_i, \bar{r}_{i-1} = r_i +$

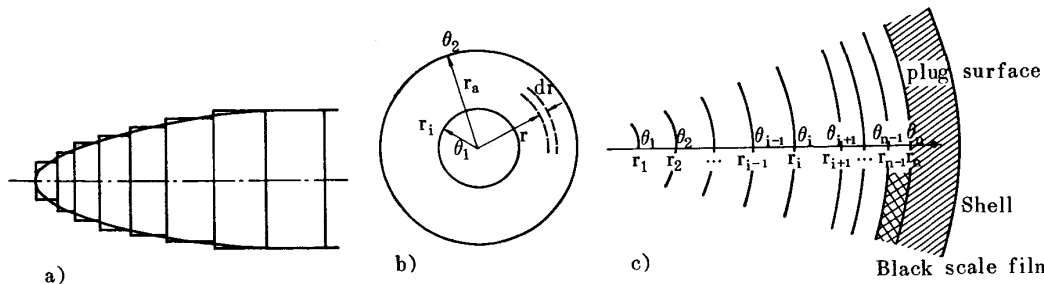


Fig. 2. Schematic view of axis and cross section of plug for analysis of temperature (axial division of plug(a), cross sections of shell(b) and cylinder(c)).

r_{i-1} 中実プラグの場合, 半径 r_1 の点と, 中心の温度は, r_1 が小さければ等しいと考えられるから(6), (7)式は, (8), (9)式となる.

$$-\left(\xi_1 + \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_1}}\right)\theta_{1,\tau+\Delta\tau} + \frac{\theta_{2,\tau+\Delta\tau}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = -\xi_1 \cdot \theta_{1,\tau} \quad (8)$$

また,

$$\xi_1 = \frac{\rho C_p i (\bar{r}_2^2 - \bar{r}_0^2)}{4\lambda_1 \Delta\tau} \dots\dots\dots (9)$$

プラグ内面が水冷される場合は, 内面の水冷熱伝達係数を α_ω , 冷却水の温度を θ_ω とすると境界条件は,

$$\lambda_1 \frac{\theta_{2,\tau+\Delta\tau} - \theta_{1,\tau+\Delta\tau}}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \alpha_\omega (\theta_{1,\tau+\Delta\tau} - \theta_\omega)$$

したがって,

$$-(1 + \xi_1)\theta_{1,\tau+\Delta\tau} + \theta_{2,\tau+\Delta\tau} = -\xi_1 \cdot \theta_\omega \dots\dots\dots (10)$$

$$\xi_1 = \frac{r_1 \cdot \alpha_\omega}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

プラグ外面にスケール膜がない金属接触の場合には, プラグ表面における接触熱伝導, 輻射を含めた等価熱伝達係数を α_E , 被せん孔材の温度を θ_s , 摩擦発熱を q_f とすると, 境界条件は,

$$-\lambda_n \frac{\theta_{n,\tau+\Delta\tau} - \theta_{n-1,\tau+\Delta\tau}}{r_n \cdot \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} + \frac{0.5q_f}{2\pi \cdot r_n} + \alpha_E (\theta_s - \theta_{n,\tau+\Delta\tau}) = 0$$

ただし, 摩擦発熱量は, プラグと被せん孔材に等分されるものとした. したがって, (11)式が得られる.

$$\theta_{n-1,\tau+\Delta\tau} - (1 + \xi_n)\theta_{n,\tau+\Delta\tau} = -\xi_n \cdot \theta_s - \frac{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}{4\pi \cdot \lambda_n} \cdot q_f \dots\dots\dots (11)$$

$$\xi_n = \frac{r_n \cdot \alpha_E}{\lambda_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}$$

つぎに, プラグ外面にスケール膜がある場合は, プラグ外層の $i=n-1$ をプラグ地金表面, $i=n$ をスケール表面として, $\lambda_n = \lambda_{scale}$ とすればよい.

以上, (6), (8), (10), (11)式などを用いて, せん孔時のプラグの状態が, 内部中実, 内面水冷, 外面黒皮スケール膜のありなしを考慮して解析することによりせん孔時のプラグ温度を算出することができる. なおこれらの式に用いた変数は次のとおりである.

r : 半径方向の位置, θ : 温度, λ : 熱伝導率 [kcal/m·h·°C], q_f : 摩擦発熱 [kcal/m²·h], α : 熱伝達係数 [kcal/m²·h·°C], L : 分割要素の軸方向長さ [m], ρ : 密度 [kg/m³], C_p : 比熱 [kcal/kg·°C], $\Delta\tau$: 微小時

間 [h]

またこれらの式は,

時刻 $\tau + \Delta\tau$ における各点の温度, $\theta_{i,\tau+\Delta\tau}$ を未知数とした n 元一次連立方程式となるので(12)式のように表わすことができる.

$$\begin{pmatrix} b_1 c_1 \\ a_1 b_2 c_2 \\ a_3 b_3 c_3 \\ \vdots \\ a_{n-1} b_{n-1} c_{n-1} \\ a_n b_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_{1,\tau+\Delta\tau} \\ \theta_{2,\tau+\Delta\tau} \\ \theta_{3,\tau+\Delta\tau} \\ \vdots \\ \theta_{n-1,\tau+\Delta\tau} \\ \theta_{n,\tau+\Delta\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \vdots \\ K_{n-1} \\ K_n \end{pmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

ここで, 中実プラグの場合は, $i=1, a_1=0,$

$$\xi_1 = \rho \cdot C_1 (\bar{r}_2^2 - \bar{r}_0^2) / 4\lambda_1 \Delta\tau, C_1 = 1 / \ln \frac{r_2}{r_1},$$

$$b_1 = -(\xi_1 + C_1), K_1 = -\xi_1 \cdot \theta_{1,\tau}.$$

$$\text{中空水冷の場合は, } a_1=0, \xi_1 = r_1 \cdot \alpha_\omega / \lambda_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1},$$

$$C_1 = 1, b_1 = -(\xi_1 + C_1), K_1 = -\xi_1 \cdot \theta_\omega.$$

$$i=2 \text{ から } n-1 \text{ では, } a_i = 1 / \ln \frac{r_i}{r_{i-1}},$$

$$\xi_i = \rho \cdot C_p i (\bar{r}_{i+1}^2 - \bar{r}_{i-1}^2) / 4\lambda_i \Delta\tau, C_i = 1 / \ln \frac{r_{i+1}}{r_i},$$

$$b_i = -(a_i + \xi_i + C_i), K_i = -\xi_i \cdot \theta_{i,\tau}.$$

$$i=n \text{ の場合, } a_n = 1, \xi_n = r_n \cdot \alpha_E / \lambda_n \cdot \ln \frac{r_n}{r_{n-1}},$$

$$C_n = 0, b_n = -(a_n + \xi_n),$$

$$K_n = -\xi_n \cdot \theta_s - \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} / 4\pi \cdot \lambda_n \cdot q_f.$$

ただし, 表面スケール膜が存在する場合, $n-1$ と n の間にスケール膜があるものとし, $i=n-1$ のとき,

$$C_{n-1} = \lambda_{scale} / \lambda_{n-1} \cdot r_{n-1} / r_n \cdot 1 / \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} \text{ であり, } i=1 \text{ のときは, } \lambda_n = \lambda_{scale} \text{ とすればよい.}$$

なお, プラグ表面の等価熱伝達係数 α_E は, 次のようにして求めることができる. この場合, CRP せん孔では, プラグ表面の一部は被せん孔材と接触しているが, 残りの部分は非接触となっており, 輻射の影響をうけている. 前述したように, 周方向の温度分布は一様であると仮定しているところから, 接触部からの熱伝導と非接触部での輻射を平均化した表現となる. いま, プラグ表面と被せん孔材との周長の接触率を β とすると, α_E は次式で求まる.

$$\alpha_E = \beta \cdot \frac{\lambda_s}{r_n \cdot \ln \frac{r_s}{r_n}} + (1 - \beta) \sigma \cdot F_A \cdot f_\epsilon \times \{(\theta_s + 273)^2 + (\theta_n + 273)^2\} (\theta_s + \theta_n + 546) \dots\dots\dots (13)$$

ここで β ; プラグと被せん孔材との接触率 (プラグ軸方向で変化), λ_s ; 被せん孔材の熱伝導率, n ; プラグ表面, γ_s ; 被せん孔材の温度代表点半径, σ ; 4.88×10^{-8} kcal/m²·h·°C, F_A ; 形態係数で 1.0, f_ϵ ; 放射率係数で 0.6 が与えられる。

プラグ表面の摩擦発熱 q_f は, 次のようにして求めることができる。まず, せん孔中の圧延材の形状を近似的に円と仮定して, 体積一定の条件からせん孔圧延材の軸方向の速度は, 次式(14)の関係が成り立つ。

$$v_i = \frac{D_a^2}{D_i^2 - d_i^2} v_a = \frac{D_b^2 - d_b^2}{D_i^2 - d_i^2} v_b \dots\dots\dots (14)$$

ここで, v_a は素材, v_i はせん孔中, v_b はせん孔後のそれぞれの速度であり, D_a, D_i, D_b はそれぞれのせん孔過程における外径, d_i および d_b は, せん孔中とせん孔後の素管内径である。また, ゴージ部で被せん孔圧延材外周速とロール周速は等しいと仮定すれば,

$$N_s = \frac{D_M}{D_g} N_R \dots\dots\dots (15)$$

D_M はロール最大径, D_g は, ゴージ部圧延素管の外径, N_R はロール回転数, N_s は圧延素管の回転数である。ロール軸間距離を l_d とすると, $D_g = l_d - D_M$ となる。したがって, せん孔中のプラグと圧延材の相対周方向速度差, U_i は,

$$U_i = \frac{\pi d_i}{60} |N_s - N_d| \dots\dots\dots (16)$$

N_d はプラグの回転数である。よつて, 圧延材の相対すべり速度, v_s は, (14), (16)式より,

$$v_s = \sqrt{u_i^2 + v_i^2}$$

いま, GELEJI⁴⁾ による摩擦係数 μ は, 温度 T , 速度 v で,

$$\mu = 1.05 - 0.0005T - 0.056 \cdot v$$

これより摩擦係数 μ_i を求める。したがって, プラグ軸方向単位長さ当たりの摩擦発熱 q_f は, 圧延圧力を P_i とすれば,

$$q_f = \frac{\beta}{J} \pi \cdot d_i \cdot P_i \cdot \mu_i \cdot v_{si} \dots\dots\dots (17)$$

ただし, β は周方向の圧延材とプラグの接触率である。

2.2 せん孔時のプラグ温度解析結果

2.2.1 CRP せん孔プラグ

せん孔工程におけるプラグの温度計算条件は, 1200°C 加熱の 110 mm 径丸断面軟鋼材を 8.5 mm 厚み × 118 mm 外径 × 7 m 長さの素管に, 0.54 m/s の出側速度でせん孔圧延を行うことを仮定した。せん孔プラグは 3Cr-1Ni 低合金鋼系材質で, 94 mm 径 × 210 mm 長

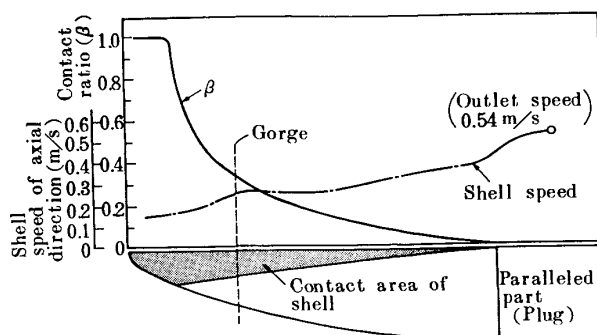


Fig. 3. Relationship between shell speed of axial direction and contact ratio; β of the plug in CRP process.

さの砲弾形である。せん孔中のゴージ部は, プラグの先端より 50 mm の内側位置とした。また, プラグは, 中実と内部水冷の場合を考え, さらに, 表面が金属肌と黒皮処理による 100 μ m 厚みのスケール膜がある状態を考慮した。プラグ内面の冷却水温度は, 20°C で熱伝達係数, α_w は, 5000 kcal/m²·h·°C のプラグ内強制対流とした。黒皮スケールの熱伝導率, λ_{scale} は, 5 kcal/m·h·°C⁶⁾ を用いた。プラグと素管の接触状態は, Fig. 3 のようになり, 接触率, β はゴージ部とプラグ先端との中間までは, $\beta=1.0$ とし, それ以下は直線的に接触部分が減少するとし, ゴージ部の素管径に対するロールすきまの比, 絞り率は, 0.9 とした。また, プラグが受ける接触圧力は, プラスチシンの実験結果より推定して, 6 kgf/mm² とした。

以上のようなせん孔圧延条件で, プラグ表面層温度の軸方向および断面内の温度分布を算定すると Fig. 4 のようになる。これから金属肌プラグでせん孔する場合を仮定すると, せん孔末期のプラグ表面温度は, 1200°C 以上になり, 先端は, 中心まで表面とほぼ同じ温度まで上昇することがわかる。ゴージ部近辺でも表面は非常に高温になるが, 内部は低目になる。この状態は, せん孔素管の薄物で時間的に長い工程をとる場合には, さらに高温になり, 表面の最高温度は 1330°C にも達することがわかった。このようなプラグ表面温度の上昇は, 表層の軟化流動と凝着, 焼付現象をおこし, 到底せん孔はできないことがわかる。一方, 黒皮処理プラグでは, 先端のみ 1200°C 前後に達するが, ゴージ部, 肩部の温度は大きく低下し, 肩部では, 黒皮下表面が 700~800°C 程度になり, 黒皮のプラグ保護が非常に大きいことがわかる。さらに, 黒皮処理の内部水冷プラグでは, 表面温度は, 黒皮付水冷なしで使用の場合とほとんど変わらないが, 水冷プラグの肉厚を薄くすると若干低下することがわかる。

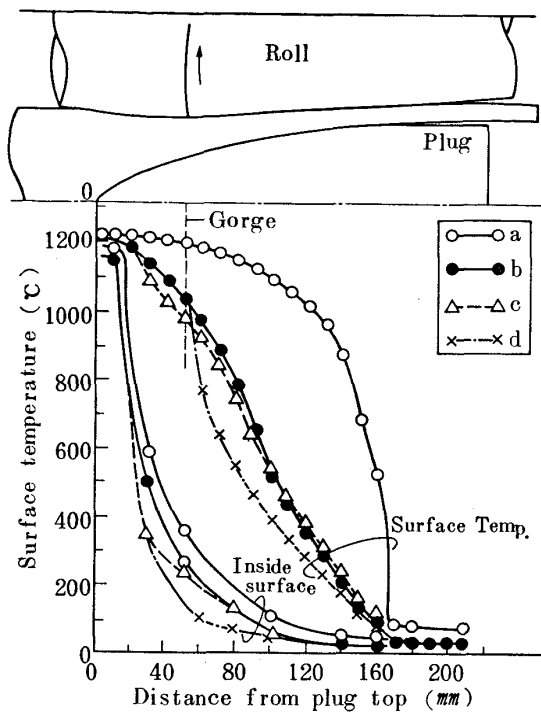


Fig. 4. Calculated temperature of plug surface.

2.2.2 PRP せん孔プラグ

せん孔時のプラグは、表面全体が被せん孔材と接触し、圧延方向のすべり摩擦を受ける状態にあるので、プラグの温度計算では、被せん孔材からの伝熱とプラグ表面での摩擦発熱を考えればよい。ここで、前述の CRP せん孔プラグの温度モデルを適用して計算を行うため、せん孔圧延速度を、入側から出側にかけて直線的に変化すると仮定し、プラグのj点における面圧は、Fig. 5に示すように、プラグスラスト荷重 P_T から(18)式で求めた。また、被せん孔材の温度は一定とし、プラグ面上の任意の点、jにおける軸方向のみの摩擦発熱量 q_f は、(19)式で求めた。

$$P_j \sin \theta + \mu \cdot P_j \cos \theta = \frac{P_T}{\pi R_0^2} \dots\dots\dots (18)$$

$$q_f = \frac{1}{J} \mu \cdot P_j \frac{V_j}{\cos \theta_j} \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{s)} \dots\dots\dots (19)$$

計算に用いたせん孔圧延の諸負荷条件は、Table 1に示す。また、プラグ先端の形状差の影響をみるため、実験用プラグを対象に鶏卵頭部形状と鋭弧錘型(C型)⁸⁾についても検討した。計算結果から、プラグの形状差による表面温度の変化はあまりみられず、Fig. 6のようになる。これに対し、表面の黒皮スケールの影響は大きく、Fig. 7に示すように 80°C 前後、温度を低くおさ

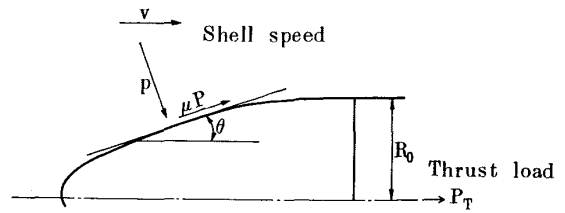


Fig. 5. Scheme for calculation of plug surface pressure at PRP.

Table 1. Calculating conditions of plug surface temperature for PRP.

Conditions	Plug shapes	
	Egg type	C type (Acute angle)
Piercing speed (Out side) mm/s	192	167
Thrust load of plug t	13	13
Shell temperature °C	1 250	1 250
Coefficient of friction	0.4	0.4
Inlet ratio of friction heat of plug	0.5	0.5

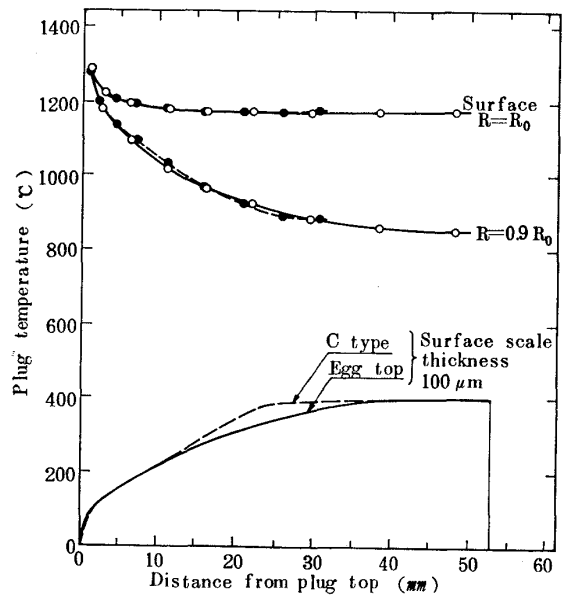


Fig. 6. Calculated temperature of PRP plugs.

えることができる。また、プラグの形状差が示す摩擦発熱量の分布は、Fig. 8のようになり、プラグの肩部の角度が急になると面圧や摩擦発熱も急激に変化し、肩部損傷につながる事が考えられる。したがってプラグ面は、鶏卵型のなめらかな弧面が有利である⁹⁾。形状がさらに鈍型になると、プラグの先端に被せん孔材のデッドゾーンができてプラグを保護するようになり、プラグと被せん孔材のすべり摩擦状態が緩和され、また伝熱も大きく制限されるようになる。そのような状態を検討するため、熱伝導の非常に小さい場合を仮定して近似的な温

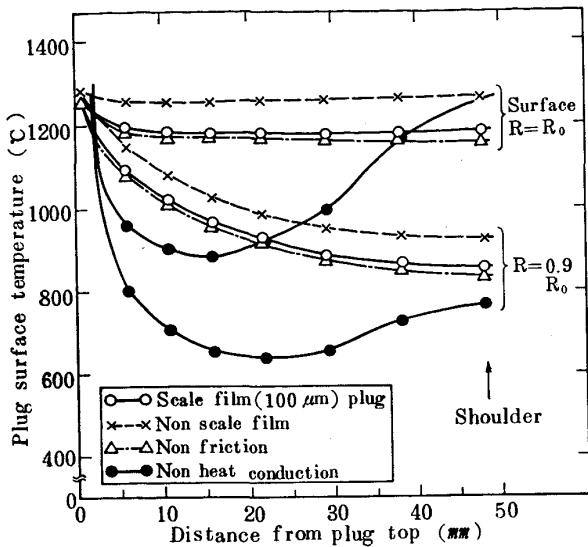


Fig. 7. Calculated temperature of PRP plugs.

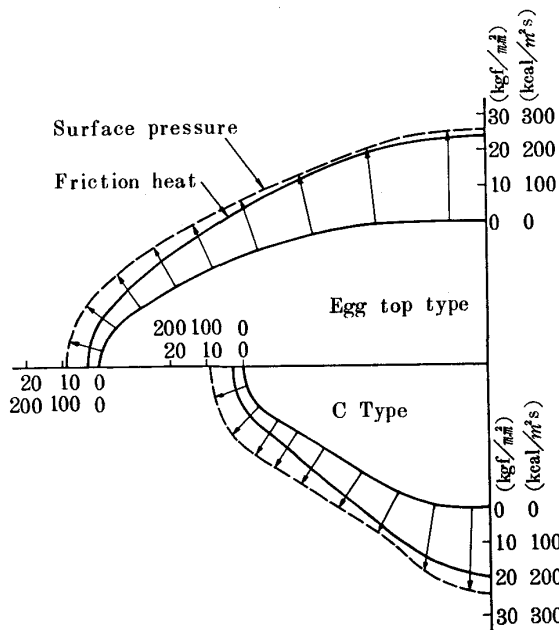


Fig. 8. Distributions of calculated load and friction heat on PRP plugs.

度計算を行くと、Fig. 7 にみられるように、最先端と肩部では高温になるが、その中間では低くなる。最先端の昇温が大きいのは、熱容量が小さいためで、デッドメタルを完全に生じせしめる場合には摩擦発熱が非常に少なくなり、伝熱も大きく阻止される形態となつて、プラグの保護に非常に有利なことが推定される。

3. プラグ表層の温度測定

せん孔圧延中のプラグの表層温度を測定するには、熱電対の埋込み法が確実とみられたが、CRP せん孔のように回転するプラグへの取付けと最表面温度測定がむずかしい。そこで、規定の高温になると熔融して表面の色が

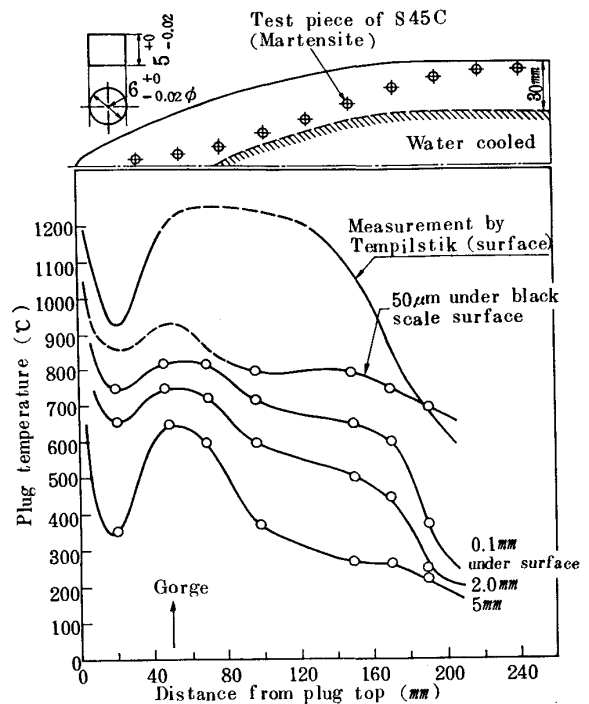


Fig. 9. Measured temperature of CRP plug.

変るテンピルステックをプラグ表面に 2 mm 孔をうがって詰め込み、せん孔後、その表面の変化状態を調べ、表面温度を推定した。さらに、表面下数ミリ下の温度を測定するために、完全にマルテンサイト化した S45C 鋼小試片をプラグ表面に打ち込み、5 本のせん孔圧延後、試片を取り出してその断面の硬さと組織の変化からプラグの上昇温度を推定した。Fig. 9 に CRP せん孔におけるプラグの温度分布を示す。これから、先端とゴージ部間に若干温度の低いところがあり、実プラグ先端が変形してできた瘤状部とゴージ部間には、かなり空間ができることが想定されるが、温度計算では接触の前提条件が全面的なるためこのようにはならないが、ゴージ部付近は、900°C 前後で、よく合っていることがわかる。また、最表面は、1210°C 表示のテンピルステックの状態から、プラグの最先端とゴージ部から肩部は、1200°C 以上の温度に上昇することがわかった。これは、金属肌で接触する表面温度にほぼ同じであり、また、黒皮スケール最表面のヴァスタイトの融点近くまで昇温することが推定できることを意味する。

4. せん孔中のプラグ表面の挙動

せん孔中のプラグ最表面温度は、前述したように、ヴァスタイトの融点近くまで上昇し、表面はスケール潤滑状態にあると考えられる³⁾。その状態を調べるために、使用後のプラグ表面から極薄層を溶解抽出し、電子顕微鏡観察を行つた。最表層の非晶質部の抽出は、プラ

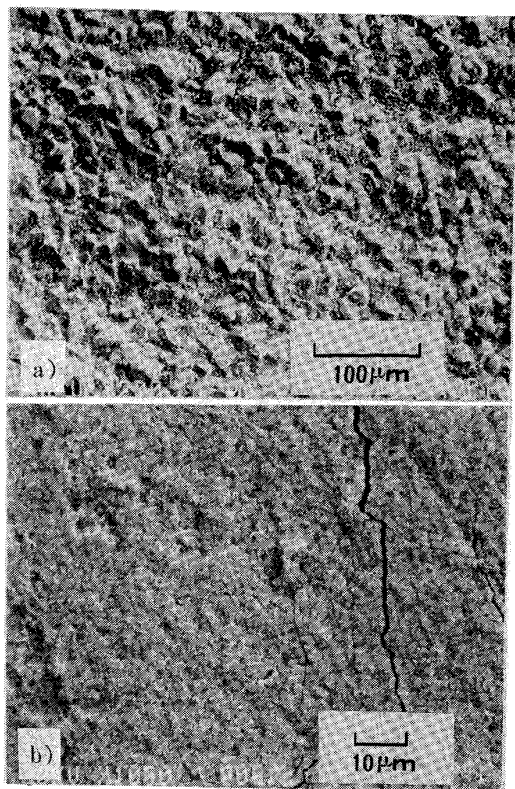


Photo. 2. Surface micro-structure of plug before (a) and after (b) campaign.

グ表面の一部を剥ぎ取り、金属部とヴースタイト晶出部を希塩酸液で溶解し、最表面層の非晶質部の難溶解層を極薄膜状にして取り出し、水洗後、電子顕微鏡観察用ルートメッシュですくい上げた。これを電子顕微鏡観察と電子線回折により調べ、プラグ最表面は数 100 \AA から数 1000 \AA の非晶質層があることをつきとめた¹⁰⁾。Photo. 2 に、プラグ使用前後の表面の走査型電子顕微鏡観察結果を示す。使用前の表面は、結晶状態の大きな凹凸がみられ、X線回折を行うと Fe_3O_4 を主体とし、若干の $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ を伴う結晶構造を示すが、使用後は、非常に滑らかで著しく微細な粒状模様を呈し、 FeO ヴースタイトと若干の $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ が検出される。しかし、すべて晶質体で現れ、最表面の非晶質化状態は判然としない。一方、表面極薄膜採取による電子顕微鏡観察を行うと、Photo. 3 にみられるように灰白色の楕円状微細粒が多数散在する極薄膜構造になっていることがわかる。また、これら薄層の一部を EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) 分析を行うと、Si の非常に富化した層になっていることがわかる。Photo. 4 には、透過電子顕微鏡観察像と、その制限視野の電子線回折結果の一例を示したが、数 1000 \AA 厚みの表層には、非晶質化した部分のほかに、若干の FeO 系晶質部があることが回折像にみられる。しかし、数 100 \AA の極薄層は、完全

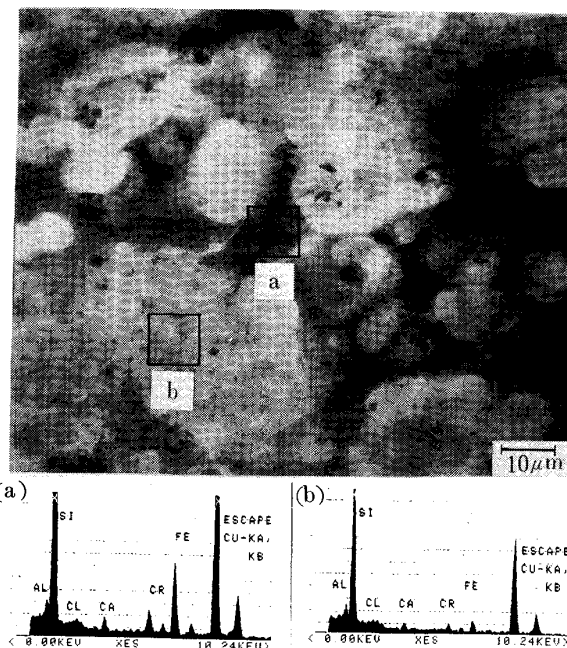


Photo. 3. Images of electron microscope and EDX analysis of limited area (a) and (b) of extra thin film on plug after campaign.

に非晶質体であり、プラグの先端からゴージ部、肩部にわたる表面は、せん孔中に溶融してスケール潤滑状態を呈し、せん孔後の急冷で非晶質状態で残ることが十分推察できる。また、この非晶質部は、 SiO_2 の高いところが多く、 $2\text{SiO}_2\cdot\text{FeO}$ 、 $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ など 1200°C 前後に融点をもつファイアライト系組成¹¹⁾に近い成分を示し、せん孔中にプラグ最表面が溶融して潤滑状態になることは間違いのないであろう。この最表面層の SiO_2 富化は、プラグ材成分のほかに、せん孔中の素管内新生面に現れる被せん孔材含有の Si の移着酸化が考えられる。このようなせん孔中のスケール潤滑を想定すると、せん孔拡張圧延などのプラグ潤滑には、Si 系固形潤滑剤の外部からの供給も有利と考えられるが、プラグ面のスケール膜をくずさぬ供給技術が必要となる。

5. 結 言

継目無鋼管のせん孔圧延における CRP および PRP せん孔プラグの温度を一次元モデルで解析し、さらに、実際のプラグ表面層の温度測定と薄層抽出によるマイクロ調査を行って、せん孔中のプラグの表面層状態を究明し次の結果を得た。

1) せん孔中のプラグ表面温度は、CRP、PRP 両法とも 1200°C 以上に上昇し、金属肌プラグによるせん孔はほとんど不可能であるが、黒皮スケール被膜をつけると、ゴージ部以降では $700\sim 800^\circ\text{C}$ になり、黒皮の効果が非常に大きく、せん孔も十分可能になることがわか

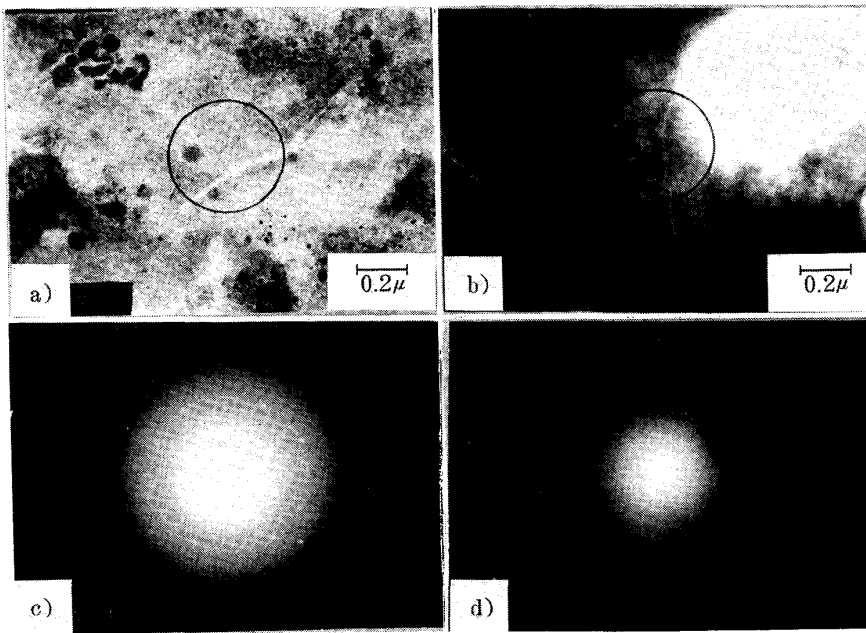


Photo. 4. Images of electron microscope and electron diffraction of limited area of thin film on the plug.

つた。

2) 実プラグ表面温度測定結果では、被せん孔材に接する最表面が、 1200°C 以上に上昇し、また黒皮下のプラグ肌は、 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ で、温度計算値によく一致した。

3) 黒皮スケールをつけたプラグのせん孔中の表面は、 SiO_2 の富化した極薄い熔融層ができて、スケール潤滑状態になることが明らかになった。またその状態は、プラグ先端から肩部にかけて全面的になることも確かめられた。

4) せん孔中のプラグ表面の SiO_2 富化現象は、プラグ材質中の Si のほかに、被せん孔材中の Si の移着酸化が考えられ、工具表面のスケール潤滑には、適当な Si 系潤滑剤の供給が有利なことが示唆された。

文 献

1) 大貫 輝: 第 81 回塑性加工シンポジウム (1982. 10 月) p. 64

2) 大貫 輝, 松尾征夫, 川並高雄: 鉄と鋼, 71 (1985), S 291
 3) 大貫 輝: 潤滑, 28 (1983) 5, p. 53
 4) 川下研介: 熱伝導論 (1971) [オーム社]
 5) A. GELEJI 著, 五弓訳: 金属加工の計算 (上) (1964), [コロナ社]
 6) A. GOLDSMITH, T. E. WATERMAN and H. J. HIRSCHHORN: Hand Book of Thermal Properties of Solid Materials (1961), [Pergamon Press]
 7) 長田修次, 神山藤雅, 河原由実, 中島浩衛, 柳本左門: 鉄と鋼, 64 (1978), S 686
 8) 大貫 輝, 柴田嘉基, 野田勝利, 中島浩衛: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 224
 9) 大貫 輝, 中島浩衛, 川並高雄: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 442
 10) 大貫 輝, 松尾征夫, 川並高雄: 鉄と鋼, 71 (1986), S 291
 11) F. P. HALL and H. INSLEY: Phase Diagram for Ceramists (1947) [Journal of the American Ceramic Society]