

水冷を行うロールの表面龜裂について

河原 英 磨*

Cracks on Water Cooling Rolls

By Hidemaro Kawahara

Wakamatsu Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Usually the roll for strips, wire rod and sheet bar has myriad minute cracks on the surface formed during its rolling operation. The cracks are very shallow at first, but they get deeper gradually until the roll surface becomes roughened, coarse, risking the spoil of the roll.

Then the cracks have to be ground, causing much wear to the roll besides considerable trouble.

All makers and operators of the rolls are interested to ascertain the cause of the cracks and protective measures thereon. The writer analyzed theoretically the thermal stresses creating the cracks and secured the following results ;

- ① A grain roll is better than a chilled roll for preventing the cracks.
- ② A roll containing nickel is superior to one without nickel, regardless of chilled or grain roll.
- ③ Water cooling should be effected fast and fully.
- ④ A small diameter roll revolving at high speed develops less cracks than a slower, large diameter roll.

[I] 緒 言

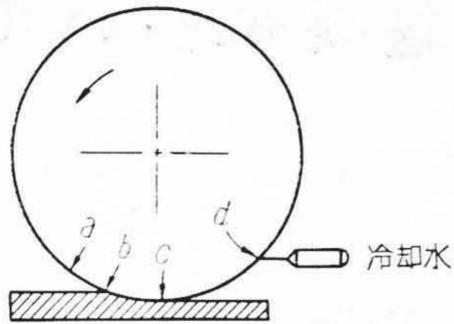
帶鋼、線材、分塊壓延ロールの如く高温材料を壓延し水冷を受けるロールは表面に無数の小龜裂を発生し、次第に深く侵入してロールの肌を荒し、又チル禿の原因をなす事もあり得る。故にロール表面を屢々切削して此の龜裂を取除く必要があり、多くの手数を要するのみならず、ロールの損耗も甚だしい。故に其の原因を探究し其の対策を考える事はロール製作者並びに使用者にとって必要な事と考えられる。筆者は此の種ロールの使用中に於ける表面附近の温度變化を計算に依つて求めると共にロール材料の高温度に於ける應力歪曲線並びに熱膨脹収縮曲線から圖式的にロール表面附近に発生する熱應力を求め、龜裂に對して安全なロールの使用法及びロール材

* 日立製作所若松工場

質を考究する一助とした。

[II] ロール表面附近の温度變化

帶鋼、線材用ロールは被壓延物に接した後直ちに水冷され、ロール全體としては比較的低温度に保たれているが、表面附近のみについて考えると急激な加熱冷却を繰返している。即ちロール表面上の任意の點を取つて其の温度變化の様子を圖示すれば第1圖及び第2圖の様に表わし得る。a, b 間は鐵板からの輻射熱に依つて表面温度が多少上昇し、b 點に於て鐵板に接すると共に急激に温度は上昇し壓延に依る摩擦熱の發生に依り益々高温度になり、c 點で鐵板から離れ c, d 間は自然冷却を行い、d 點で水冷を受けて急激に表面温度は降下する。然し此の様な表面温度變化の様子を直接測定する事は甚だ困難である。故に計算に際しては第2圖に破線で示す如



第 1 圖 壓延状態にあるロールの説明圖
Fig. 1 Explanation of a Operating Roll.

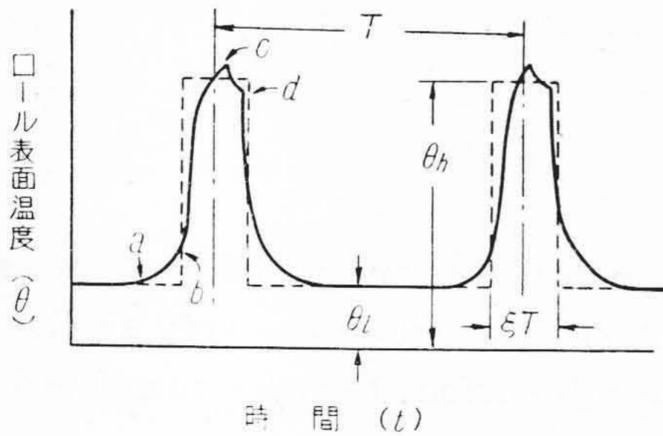


圖 2 圖 ロール表面の温度と時間の関係
Fig. 2 Relation between Surface Temperature of a Roll and time.

く b 點で急激に最高一定温度まで上昇し d 點で水冷を受けると同時に急激に冷却して水温まで降下するものと假定した。尙又ロール表面が到達する最高温度も明瞭でないが、鐵板の温度が 900°C 前後であり壓延に依つて多少温度が低下する事、ロール表面の組織から判断して變態點の少し下の温度まで上昇しているようである事、屢々ロールと板が焼附く事等を参照して、此の最高温度を 700°C と假定して計算を進めた。

ロールの回転数はかなり早い爲、ロール表面が高温低温を繰返す周期は 1~1/5 秒程度である。かゝる早い周期で表面温度が變化する場合には、温度變化を激しく起す部分はロールの極く表面附近のみに留る。故にロールを半無限個體と考え其の表面が第 2 圖の破線で示した温度變化をなすと假定して計算を行えば、温度分布は表面附近に關する限り實際のロールと殆んど一致する筈である。

半無限個體の表面に原點を取り内部に向つて x 軸を取り熱傳導微分方程式を書けば

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots \dots \dots (1)$$

周邊條件としては

$$x=0 ; \theta=f(t) \dots \dots \dots (2)$$

$$x=\infty ; \theta=a_0 \dots \dots \dots (3)$$

- 茲に
- θ ; ロールの温度
 - t ; 時間
 - K ; ロール材料の熱傳導率
 - c ; " " 比熱

ρ ; ロール材料の比重

a_0 ; 或る一定温度

$$k = \frac{K}{c\rho}$$

(2) 式に示されるロール表面の温度と時間の關係を第 2 圖の如く表わし、時間の原點を高温時の中點に選び此の曲線をフーリエ級數に展開して (2), (3) 式を満足する (1) 式の解を求めれば

$$\theta = \theta_l + \xi(\theta_h - \theta_l) + \frac{2(\theta_h - \theta_l)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n \xi \pi}{n} e^{-\sqrt{n\mu}x} \cos(n\omega t - \sqrt{n\mu}x) \dots \dots \dots (4)$$

茲に N ; ロールの毎分回転數

$$T = \frac{60}{N}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\pi}{kT}}$$

(4) 式に實際の數値を代入すれば任意の時刻に於ける表面附近の温度分布を求める事が出来る。又種々の時刻に於ける温度分布曲線群の包絡線を求めれば、一周期間に於てロール表面附近の任意の點が到達しうる最高温度を知り得る。

計算に際して、ロール冷却時刻の遅速及びロール直径回転數が表面部に發生する應用に及ぼす影響を知る爲に二つの群に分けて計算した。先づ兩者に共通な常數として

$$K = 0.04 \frac{\text{cal}}{\text{cm sec } ^\circ\text{C}} \quad C = 0.13 \frac{\text{cal}}{\text{gr } ^\circ\text{C}}$$

$$\rho = 7.7 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

$$\theta_h = 700^\circ\text{C} \dots \text{ロール表面の最高温度} \quad \theta_l = 20^\circ\text{C} \dots \text{水温}$$

(1) 冷却時期遅速の影響

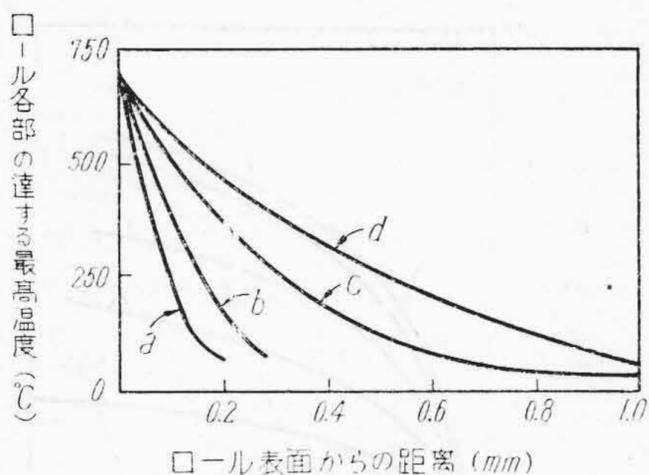
$D=540 \text{ mm}$, $r. p. m=180$, の帶鋼ロールについて水冷の時期、即ち ξ の値を種々變更して、各 ξ に對してロール各部の到達しうる最高温度を求め第 3 圖に示した。圖中の各曲線に對する ξ の値は

- (a) ; $\xi=0.0053$ (b) ; $\xi=0.01$
- (c) ; $\xi=0.05$ (d) ; $\xi=0.1$

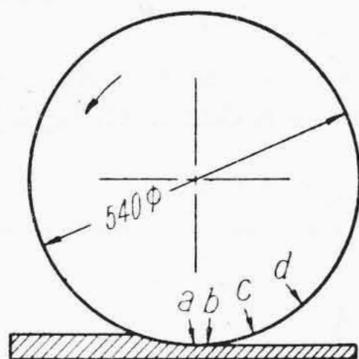
尙大略の水冷位置を第 4 圖に示す。

(2) ロールの直径、回転數の影響

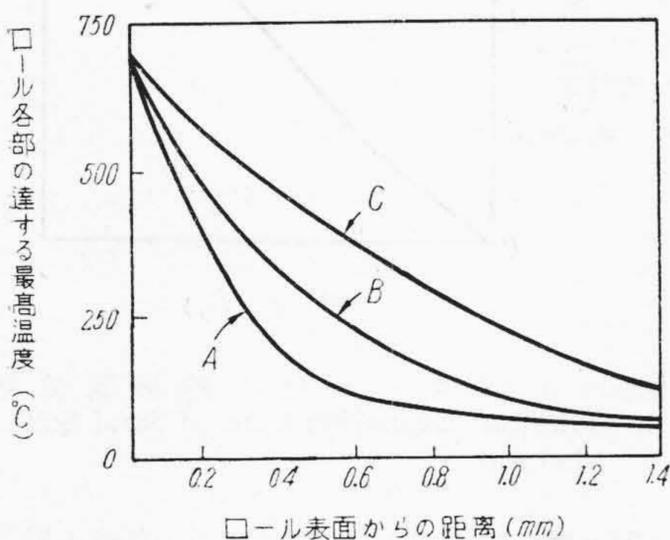
三種の直径と回転數を異にするロールに就て計算を行つたが、此等を比較する爲に水冷の位置は全部同一とし $\xi=0.1$ 即ちロール上の一點が鐵板から離れて 1/10 回転した所で水冷されるものと假定した。計算を行つたロールの直径、回転數並びにロール種別を第 1 表に示し、



第3圖 ロール各部の一回轉中に示す最高温度
Fig. 3 Maximam temperature of any point of a roll.



第4圖 ロール表面の水冷位置
Fig. 4 Water cooling position of a roll.



第5圖 ロール各部の一回轉中に示す最高温度
Fig. 5 Maximam temperature of any point of a roll.

第1表 計算に使用したロールの種類
Table 1 Classification of Rolls Referred to Calculation.

第5圖中の 曲線の記號	ロール直径 (φ)	回轉數 (r. p. m)	ロール種別
A	325	375	線材ロール
B	540	180	帶鋼ロール
C	750	60	分塊ロール

各ロールの表面附近の點が到達する最高温度を第5圖に示す。

[III] ロール表面附近に發生する熱應力

前節に於て計算した結果に依れば、ロールの極く表面附近のみが温度變化を行い、内部の大部分は或る一定低温度を保持している。故にロール表面が高温度になつた際には表面附近に大きな壓縮應力が發生する。然るに此の壓縮應力を受ける層は非常に薄い爲、此の應力と鈎合を保つべき内部の引張應力は非常に小さく、應力歪共に殆んど問題にならない僅小値である筈である。然し表面附近の薄層は前述の如く大きな壓縮力を受け、常温に於ける白銑の弾性係數を用いて此の壓縮應力を計算すれば $400 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ 以上になり、ロール表面は壓縮破壊を起す筈である。然し實際の場合、此の壓縮力を受ける際には此の部分が高温度になつており、塑性變形を起す爲應力の値はさほど大きくならない。さて此の部分が冷却水に依り急冷されると收縮を行い、壓縮應力は減少して行く若し此の材料が高温度まで弾性的であるならば、温度が常温まで降下した場合には壓縮應力は完全に消失する筈であるが、實際は高温度に於て塑性壓縮を受け永久變形として縮みを生じている爲、此の部分の温度を常温まで降下せしめれば當然引張應力が残る筈である。此の壓縮力から引張力に變る温度は相當高温度であるから引張應力に變つた後の歪も弾性的には取扱い得ない。

以上述べた様に弾性的な計算に依つて發生する熱應力を求め得ないので、材料の各種温度に於ける引張試験に依つて得られた應力歪曲線並びに熱膨脹收縮曲線及び温度分布曲線を基にして圖式的に應力を求める事にした。

上に述べた様な熱應力を考える場合、ロール表面の薄層には同一平面内に於て互に直角方向に作用する同じ大きさの力が考えられる。故に一方向に作用する應力と歪の間には次の關係が成立する。

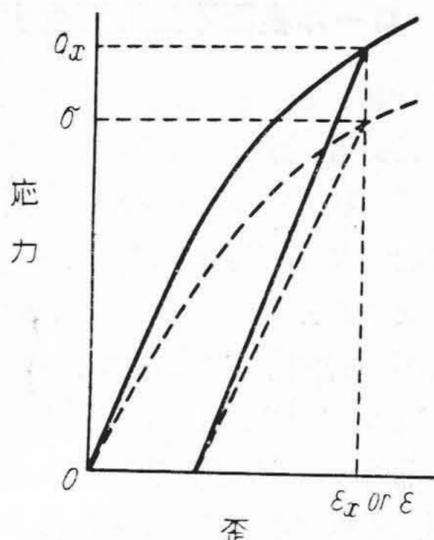
$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x (1 - \nu) \dots \dots \dots (1)$$

- 茲に σ_x ; x 軸方向に作用する應力
- ϵ_x ; x 軸方向の歪
- E ; 弾性係數
- ν ; ポアソン比

然るに材料を試験機に依つて引張つた場合、即ち一方向のみに力が作用する場合の應力と歪の關係は

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma \dots \dots \dots (2)$$

故に若し、 $\epsilon_x = \epsilon$ ならしむる爲には $\sigma_x = \frac{\sigma}{1 - \nu}$ でなければならぬ。故にロール表面附近の熱應力を求める爲に先づ第6圖に點線で示すように試験機に依つてロール材料の各種温度に於ける應力歪曲線並びに残留歪の測定を



第 6 圖 一次元應力及び二次元應力時に於ける應力歪曲線

Fig. 6 Stress Strain curves under One or Two Dimensional Stresses.

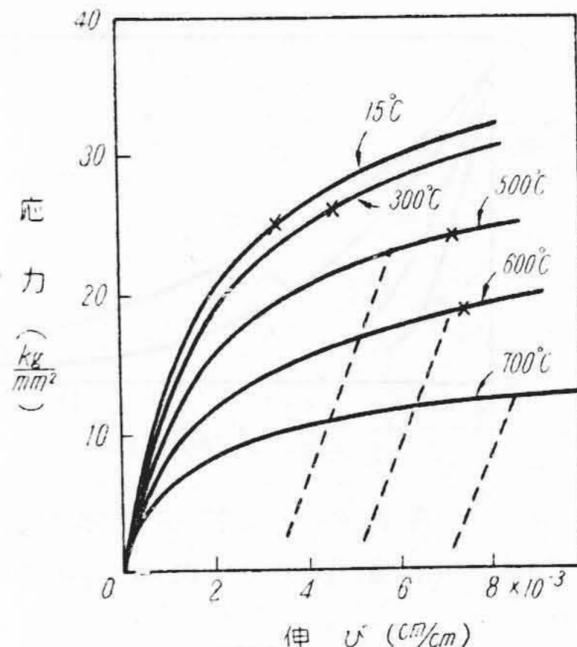
行い、此の應力を $\left(\frac{1}{1-\nu}\right)$ 倍して改めて實線で示すような應力歪曲線を求めておけば、此の曲線はロール表面附近の一方向の變形と應力との關係を示す筈である。以後は此の補正した曲線を用いてロールの熱應力を求めて行く。嚴密に言えば (1) 式は弾性體にのみ適用出来る關係であるが、 ν の値を温度に依つて變更する事に依り塑性變形に對しても近似的に用うる事が出来る。鑄鐵に對する ν の値として、J. Land⁽¹⁾ 氏の文獻から次の値を選んだ。

0~400°C	$\nu = \frac{1}{4}$
600°C	$\nu = \frac{1}{3}$
800°C	$\nu = \frac{1}{2}$

尙一例としてサンドロール材の高温度に於ける引張試験結果を第 7 圖に示す。又應力圖式解中に材料の熱膨脹量が必要であるので、實測を行い第 8 圖に示した。

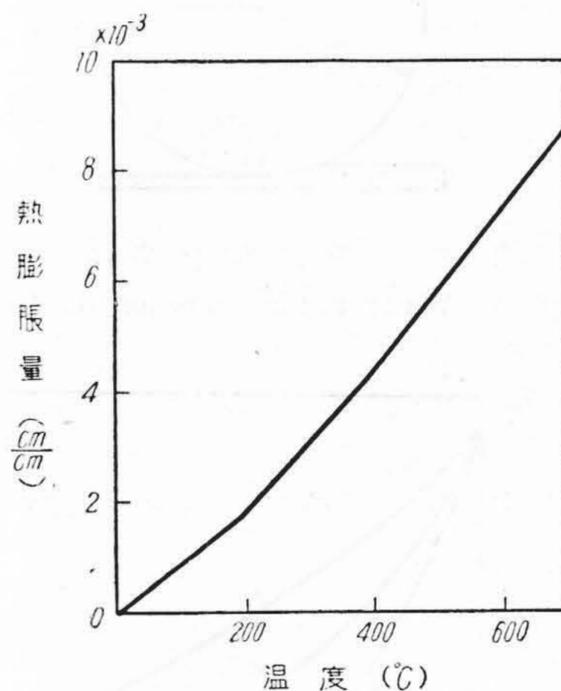
應力圖式解を行うに先立ち次の三つの假定を行つた。

- (1) 高温度に於ける壓縮側の應力歪曲線は測定困難な爲引張側に於ける曲線と同型なりと假定した。
- (2) 引張試験に於て材料破斷のため求め得ない部分は實測上の曲線を $\epsilon = \alpha \delta^n$ の式に表わし、此の曲線を延長して用いた。
- (3) 高温度に於ける引張試験には材料の匍匐現象が起るので測定は總て約 15 分間で完了せしめる様に行つた。實際のロール表面の熱應力はかなりの早さで變化するから、匍匐は少く、引張試験の場合の應力と歪の關係とは多少異つた應力歪曲線に沿つて變化すると思われるが、以下の圖式解に於ては、總て引張試験に依つて得られた應力歪曲線に沿つてロール表面の應力は變化すると假定した。



第 7 圖 サンドロール材の應力歪曲線

Fig. 7 Stress Strain Curves of Sand Roll Material.



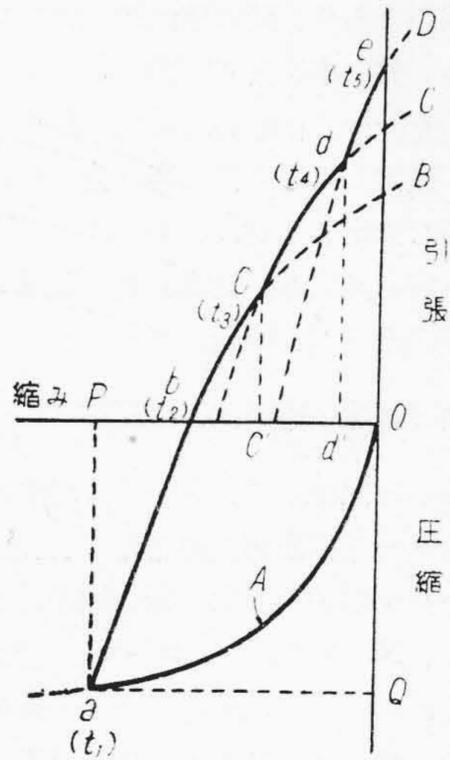
第 8 圖 サンドロール材の熱膨脹曲線

Fig. 8 Thermal Expansion Curve of Sand Roll Material.

扱、第 9 圖によつてロール表面附近の任意の點の熱應力の變化狀況を考へて見よう、常温から温度 $t, ^\circ\text{C}$ に熱された點の受ける壓縮應力は、 $t, ^\circ\text{C}$ に相當する補正済みの應力歪曲線 A 上に於て縮み OP が其の材料の $t, ^\circ\text{C}$ に於ける熱膨脹量 $\alpha\theta_t$ に等しい様な點 a の示す應力 OQ である。此の點が此の温度から冷却すると Pb だけ縮んで應力は消失する。此處で b 點は a 點の殘留歪を示す點であり、其の温度 t_2 は $Pb = \alpha\theta_t - \alpha\theta_{t_2}$ なる關係を満足する温度である。以上で b 點の位置と温度 t_2 を知り得る。b 點以後の冷却は温度 t_2, t_3 の平均値に對する應力歪曲線 B に沿つて引張力が増加し C 點に達する。

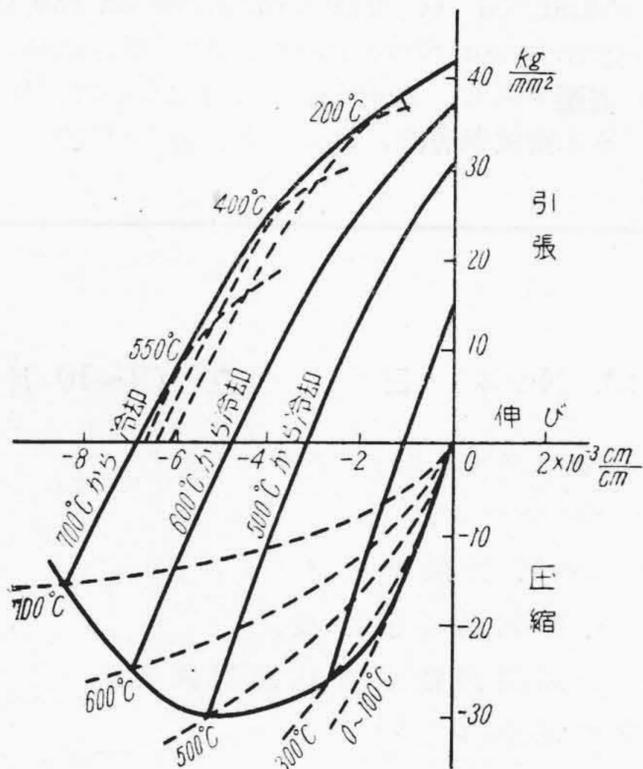
但し $bc' = \alpha\theta_{t_2} - \alpha\theta_{t_3}$

以下同様に次第に低温度の應力歪曲線 C, D, ... に沿つ



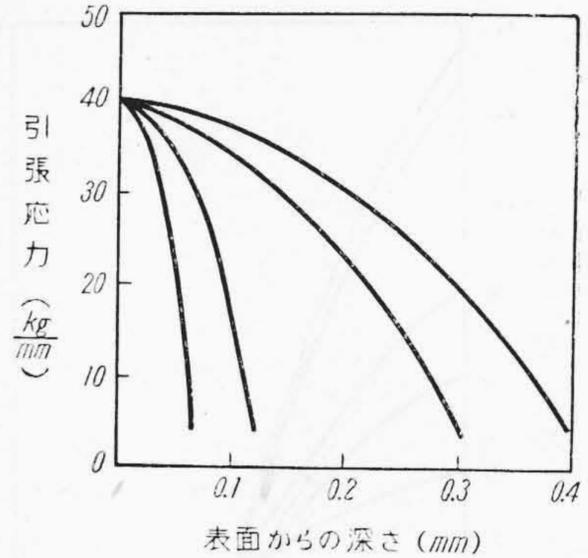
第9圖 熱應力圖式解法説明圖
Fig. 9 Explanation of Graphical Solution of Thermal Stresses.

溫度降下して e 點に於て常溫 t_s に至る。かくして t_s °C に加熱された部分が常溫迄冷却される途中の應力状態、並びに常溫降下後の引張力 Oe を知り得る。一例としてサンドロールに對する加熱冷却中の應力と歪の關係を第10圖に示す。此の圖に依つて 500, 600, 700°C に加熱された部分が常溫まで降下した場合に發生する應力を知り得た。又第3圖、第5圖に於てロール表面附近の達し

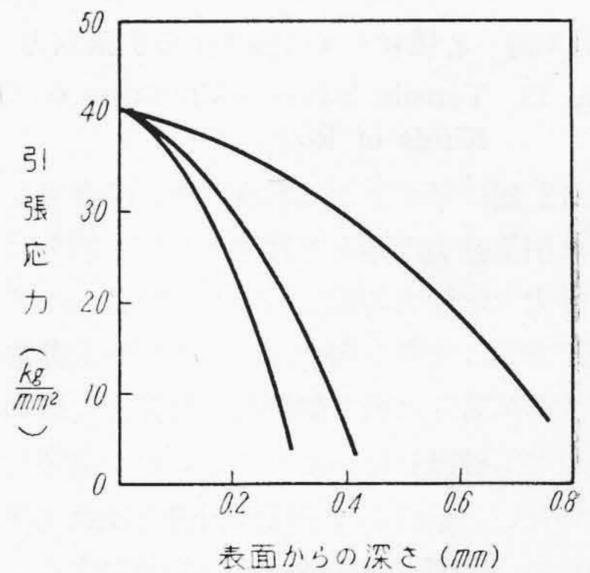


第10圖 サンドロールの熱應力圖式解
Fig. 10 Graphical Solution of Stresses Creating on the Sand Roll.

うる最高溫度を知り得たので、此の兩圖からロール表面附近が此の溫度から常溫まで冷却された場合各部に發生する引張應力を求める事が出来る。サンドロールについ



第11圖 ロール表面附近に發生する引張應力
Fig. 11 Tensile Stesses Creating on the Vicinity of Roll Surface.



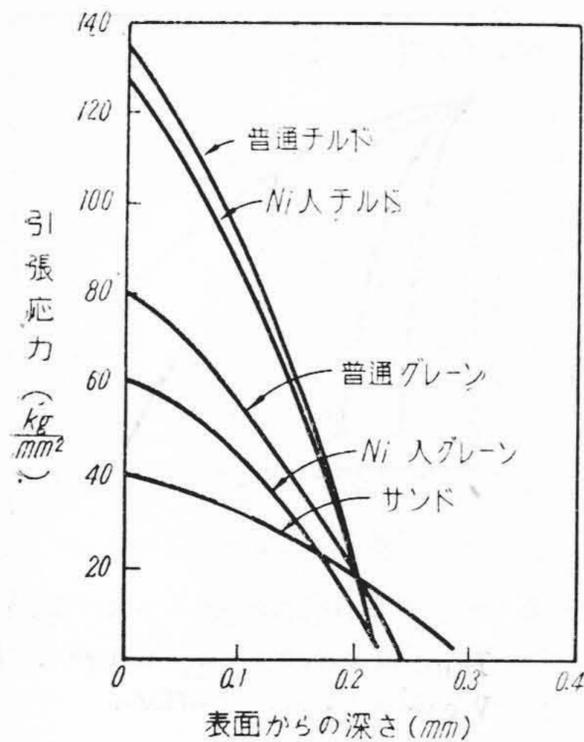
第12圖 ロール表面附近に發生する引張應力
Fig. 12 Tensile Sresses Creating on the Vicinity of Soll Surface.

て此の常溫降下後の引張應力分布を求め第11圖、第12圖に示す。茲に第11圖、第12圖は夫々第3圖、第5圖に示す溫度から冷却された場合である。

以上の方法に依つてサンドロールの他、チルドロール、ニッケル入チルドロール、グレーンロール、ニッケル入グレーンロールの表面附近の冷却後應力分布を求める事が出来る。これ等5種のロールを比較する爲に、第3圖、曲線Cの溫度分布から冷却した場合、各ロールの示す應力分布を第13圖に示した。

[IV] 結果の考察

第11圖から明らかな如く、サンドロールの最表面の溫度が 700 °C まで上昇すると假定すれば、溫度上昇中 450°C 前後で最大の壓縮力 $30 \frac{kg}{mm^2}$ を受け、水冷後常溫に降下すれば約 $40 \frac{kg}{mm^2}$ の引張力を發生する。故にロール表面はかくの如き高應力の繰返を受けている。然し表面はかゝる高應力を發生しているが、第12



第13圖 各種ロールに発生する引張應力
Fig. 13 Tensile Stresses Creating on Some Kinds of Rolls.

圖、第13圖に示すように水冷の遅い場合でも約0.3mm内部では引張應力は殆んど発生しない。即ちロール表面附近には大きな應力勾配を発生している。かくの如く應力勾配が非常に大きな場合には、あたかも非常に鋭い切欠を有する試験片に於て切欠底の計算上の應力は抗張力を越過しても破断しないように、簡単に龜裂を発生するとは限らない。結局かゝる壓縮引張を繰返す事に依り疲勞を起して、表面附近に浅い龜裂を発生すると考えられる。此の場合表面の最高應力が相等しい場合には應力勾配の緩かな程龜裂を発生しやすい事は一般に認められている事實である。此の點から考えれば水冷時期が遅い程

應力勾配は緩かであり、又大型低速のロールの方が勾配は緩かである。故に小型高速回轉のロールを使用し水冷を速かに且つ充分行う程龜裂は発生し難いものと思われる。又龜裂が発生しても非常に浅い筈である。次にロール種別の優劣を決定する爲には上に求めた應力分布と材料の疲色限（特に高温壓縮低温引張の繰返しに對する値とを對照して決定すべき問題であるけれども、常温に於ける繰返し曲げ試験の結果はいづれも $15 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ 前後の値である事から想像して、ロール表面附近に発生する應力が大きいロール程龜裂を発生しやすいと思われる。故に鑄物ロールを龜裂の発生し難い順序に配列すれば、サンドロール、Ni入グレンロール、普通グレンロール、Ni入チルドロール、普通チルドロールの順になる。尙一般的に言えば、熱應力發生の過程から考えて、低温に於て弾性係数が小さく、高温まで弾性的で殘留歪の少ない材料程ロール表面に発生する引張應力は小さく龜裂を発生し難い筈であり、此の點から考えればニッケルの含有は非常に有効であり、又モリブデン含有も高温弾性的と言う條件に適合するものである(2)。

最後に本研究を遂行するに際し御指導を賜つた九州大學石橋教授に對し深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Thermal Stresses in Ingot Moulds. By T. Land. M. A. The Committee on the Heterogeneity of Steel Ingots. No. 20, 1942.
- 2) 高壓タービン車室の經年破損について。奥田克巳 日本機械學會誌、第53卷、第382號

Vol 13. No 4 日 立 (7~8月)

- 八幡製鐵所納 950 mm 二重逆轉式分塊壓延機用
4,000 kW イルグナー方式電氣設備に就て
- 8印長翼型コンベヤーチェン
- エヤーコンディショナーに就いて
- 日立殘光性ブラウン管
- 日立H型コンベヤー
- 日立K型ホイスト

東京都大井
坂下町 2717

日 立 評 論 社

Vol 13. No 4 日 立 (9~10月)

- 沖繩島納メタルクラッドスキッチギア
- // 納ケーブル
- 新型 200 W 反撥モーター
- 新型可搬式遠心清淨機
- 裸線一通話路搬送電話端局装置
- 空飛ぶ電車(レールプレッ)
- 日立印刷機に就いて

誌代 一カ月 ¥ 60 千 6
半ケ年分 ¥ 210 千 35
一ケ年分 ¥ 420 千 70