

© 1992 ISIJ

 論文
 ////////////////
 論文
 ////////////////

サーマルクラウン抑止冷却ロールの開発と ストリップの均一冷却

 総田 良之*・益居 健*²・磯野 哲夫*³

Development of a Quenching Roll to Control the Thermal Crown and the Effect on Uniform Cooling of a Strip

Yoshiyuki KASEDA, Takeshi MASUI and Tetsuo ISONO

Synopsis :

Roll quenching is one of the cooling methods of a strip in a continuous annealing line. The strip is cooled by contact with the roll which is cooled by a coolant (usually water) from the inside. Applying this method, it is important to unify the temperature of the strip transversely and to prevent shape defects of the strip when the strip is in contact with the roll.

This report describes numerical analysis of the thermal crown on the quenching roll, as well as, the new structure of the quenching roll which restrains the thermal crown in order to prevent non-uniform contact between the strip and the roll. The newly developed roll is structured that the outer sleeve with screw-shaped waterways inside, is put on the inner sleeve using a shrink fit method. Thermal expansion of the roll sleeve which is heated by the strip is canceled by the initial strain of the shrink fitting.

Applying this quenching roll and correcting the shape defects before cooling are very efficient to cool a strip uniformly and obtain a flat strip.

Key words : cooling; continuous annealing line; roll quenching; strip; roll; flatness; shrink fitting; thermal crown.

1. 緒 言

高温のストリップを急冷する冷延鋼板の連続焼鈍プロセスにおいて、内部を水冷したロールに巻き付けて冷却する方法は、100°C/s以上の冷却速度を達成できる特徴を有する¹⁾²⁾。巻付角度の変更によってストリップとロールの接触時間を調節し冷却の終点温度を容易に設定できる、冷却水との接触による鋼板の酸化がなく酸洗が不要である等の利点がある。反面、熱の流れが固体接触の熱伝達に支配され、幅方向に不均一な冷却となり形状不良を発生しやすい欠点を有する。

ロール冷却時の形状不良発生に関しては、ストリップの長手方向温度勾配に起因する熱応力の影響を評価した研究や³⁾、ロール表面の摩耗による冷却特性の変化に関する研究等があるが⁴⁾⁵⁾、ロール構造そのものについてはほとんど検討されていない。操業時、低温に保たれた

ロールに高温のストリップが常に接触しているため、ロールの軸方向及び径方向に大きな温度勾配が存在する。ここから形成されるサーマルクラウンが、幅方向の均一な接触を妨げ不均一な冷却を生む主要原因であると推察される。

本論文では、冷却ロールに形成されるサーマルクラウンを評価し、これを抑止するロール構造を提案した。更にクラウン抑止冷却ロールを用いたモデル実験を行い均一冷却効果を明確にした。

2. 従来型冷却ロールに形成される サーマルクラウン

既存の水冷ロールに形成されるサーマルクラウンを有限要素法を用いて評価した。

2.1 計算条件

Fig. 1 に示すように巻付角度 β で接触するストリッ

平成 3 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 3 年 7 月 22 日受付 (Received July 22, 1991)

* 住友金属工業 (株) 鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660)

*² 住友金属工業 (株) 鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業 (株) 設備技術部 (Plant Engineering Department, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

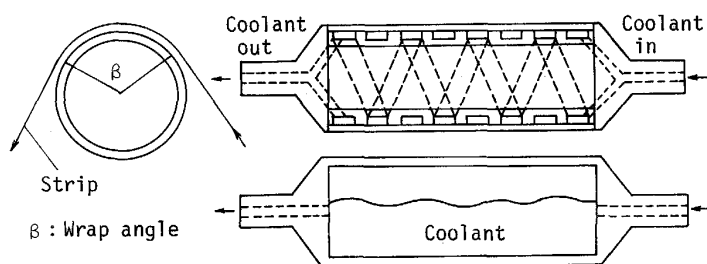


Fig. 1. Ordinary type quenching rolls.

Table 1. Calculating conditions for ordinary type quenching roll.

Strip width (W)	600, 1 000, 1 200 mm
Thickness of roll sleeve (δ)	6~50 mm
Four screw-shaped waterways	$l_1=28$ mm, $l_2=12$ mm
Coolant (water)	18 t/h
Strip temperature (T_S)	600°C
Coolant temperature (T_W)	50°C
Young's modulus (E)	205 800 N/mm ²
Coefficient of linear thermal expansion of roll sleeve (α)	$1.1 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$
Thermal conductivity of roll sleeve (λ)	45.3 W/(m·K)
Heat transfer coefficient of strip/sleeve interface (α_S)	1 774 W/(m ² ·K)
Heat transfer coefficient of sleeve/coolant interface (α_W)	14 600 W/(m ² ·K)
Wrap angle (β)	$\pi/2$ rad

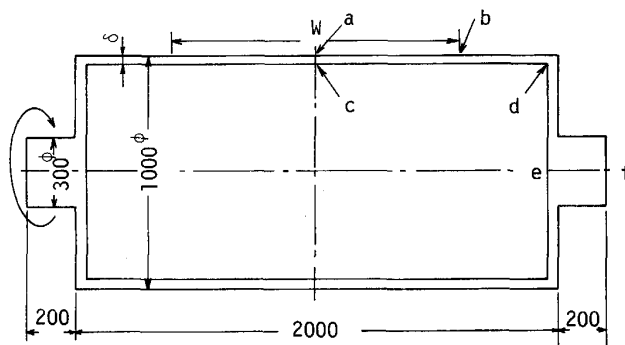


Fig. 2. Quenching roll dimension for calculation.

ブとロール間には、係数 α_S の熱伝達がある。それ以外のロール表面は雰囲気ガスとの間で熱伝達があるが、ガスとロール間の熱伝達は平板に対する乱流熱伝達を考慮すると α_S に比べて十分小さいので無視した¹¹⁾。ロール表面の一点に着目すると、短時間に加熱と非加熱を繰り返しているが(1)式で示す係数 α_{Seq} でロール全周に均様な熱伝達が生じていると仮定し、軸対称の2次元定常問題とした。

$$\alpha_{Seq} = \alpha_S \cdot \beta / 2\pi \dots\dots\dots (1)$$

ストリップの温度は冷却によって降下するが、平均温度 T_P を考え一定とした。

次に、ロールは中に水を満たしたり、スリーブ内面の周方向や軸方向に張り巡らした水路に水を流して冷却されているが (Fig. 1)、スリーブ内面に $l_1 \times l_2$ の矩形断面の水路が一面に設けられていると仮定し(2)式¹¹⁾で示す管内乱流熱伝達式で係数 α_W を求め、全体が冷却されているとした。

$$\left(\frac{\alpha_W \cdot d_{eq}}{\lambda_W} \right) = 0.023 \left(\frac{d_{eq} \cdot u}{\nu_W} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{\nu_W}{a_W} \right)^{1/3} \dots\dots (2)$$

ここで d_{eq} は、水路の相当直径で $d_{eq} = 2 \cdot l_1 \cdot l_2 / (l_1 + l_2)$ である。

板温度と同様に冷却水温度も平均温度 T_W を考え一定とした。Table 1 に計算条件を示す。200 m/min で走行する 600°C の鋼板 (0.8 mm 厚 \times 1 200 mm 幅) を

水量 18 t/h のロール 1 本で 50°C 冷却することを前提とした²⁾。

2.2 解析モデル

Fig. 2 に解析したロール形状を示す。ロール半分を4節点の軸対称要素で分割した。節点数は 813、要素数は 700 である。ロール表面の板幅内 (ab) にストリップとの熱伝達を、ロール内面 (cd) に冷却水との熱伝達の条件を与えた。節点は、ロール中央 (ac) で軸方向の変位を、ロール軸 (ef) で径方向の変位を拘束した。解析には、汎用プログラムの COSMOS/M を使用した。

2.3 計算結果と考察

2.3.1 サーマルクラウン形状

Fig. 3 にスリーブ厚を 20 mm とし板幅を 600, 1 000, 1 200 mm とした場合の、表面温度及び半径当たりのサーマルクラウン形状を示す。板端部に温度の急勾配が形成され、板端より 50 mm 程度内側で一定の温度となっている。サーマルクラウンは、スリーブの剛性のため温度勾配に比して板幅内に大きく入り込み、板端より 200 mm 程度内側で一定になる。板幅当たりのサーマルクラウンは半径当たりのサーマルクラウン量 ΔCr の約半分であるが、通板材の幅拡大時には ΔCr が直接ストリップに影響する。

Fig. 4 にスリーブ厚とロール中央部表面温度及び ΔCr の関係を示す。スリーブ厚が増加すると、表面温度はほぼ線形に増加し、クラウン量も同様に増加している。

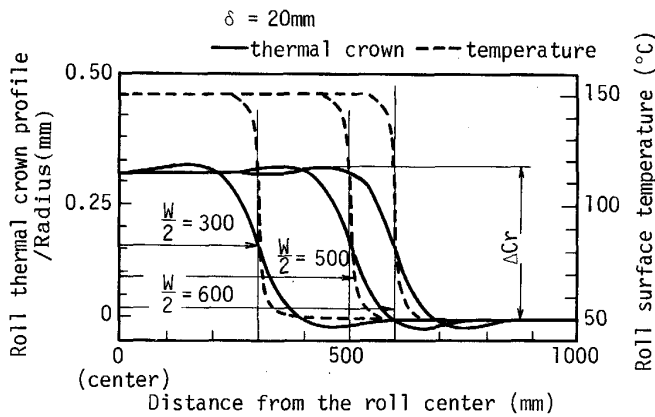


Fig. 3. Temperature and thermal crown distribution on the roll surface.

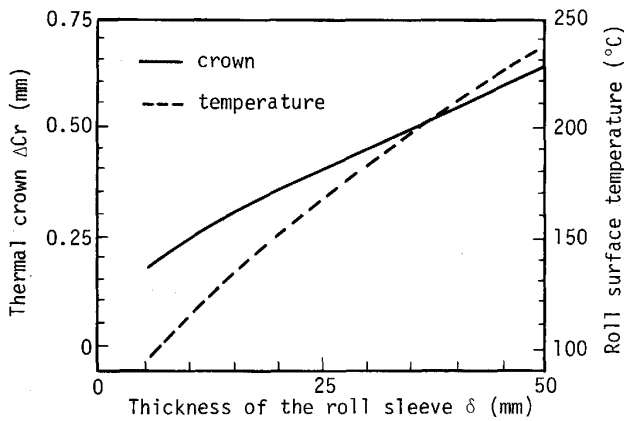


Fig. 4. Effect of the sleeve thickness on surface temperature and thermal crown.

計算では板幅内に均一な熱伝達を仮定したが、実際は形成された凸クラウンによって板幅中央部は高面圧で接触し端部ほど面圧が低下または接触しなくなるため、熱伝達は幅中央が大きくなる傾向にある。その結果、Fig. 3に比し温度勾配が緩やかになり、クラウンも更に板幅の内側に入り込むと予測される。

2・3・2 ストリップ不均一冷却と形状不良

サーマルクラウン（凸クラウン）によるストリップとの不均一な接触で板幅中央が強冷されやすく、熱ひずみの差から耳波になりやすいが、一方では中央部の張力が高まり中伸び傾向になる⁴⁾。両方の影響が重複して形状不良が発生すると考えられる。

ライン張力を高めて接触を安定させる方法が知られているが⁵⁾、凸クラウンロールで幅方向に不均一な引張りを負荷すると、ストリップを絞り込むトラブルを誘発しやすい^{6)~8)}。このため、薄手広幅ストリップの高速冷却は難度が高く開発課題として残されている。

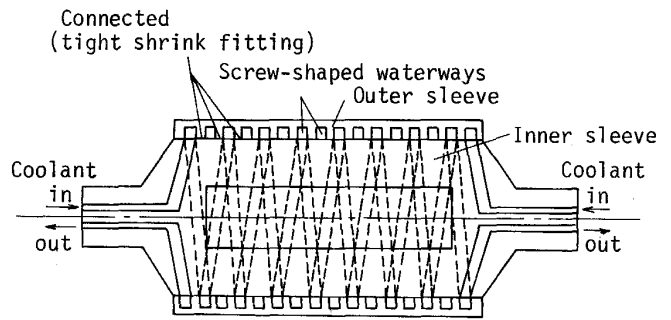


Fig. 5. Newly developed quenching roll.

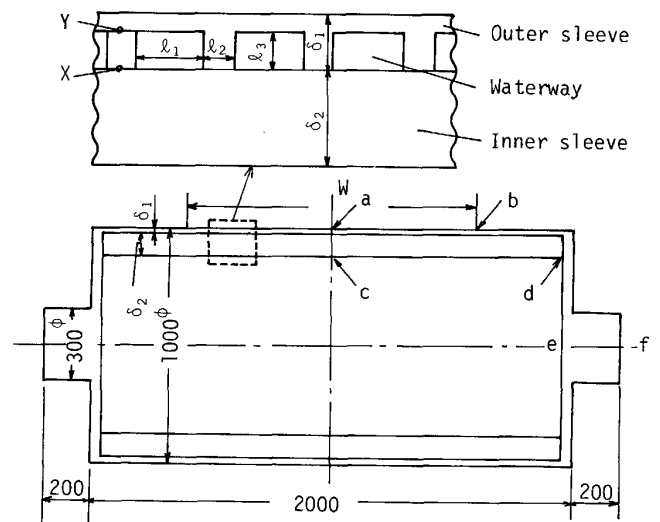


Fig. 6. Newly developed roll dimension for calculation.

3. サーマルクラウン抑止ロールの開発⁹⁾¹⁰⁾

3・1 サーマルクラウン抑止構造

板幅が変化するとサーマルクラウンの形が変化し板温度が変化すればクラウン量も変化するため、初期のクラウン加工では対応が難しい。熱膨張するスリーブを径方向に拘束すれば膨張分が圧縮ひずみに変わり、クラウンは抑止される。Fig. 5にロール構造の概要を示す。内面に複数の螺旋状水路を有する外スリーブを、ロール本体の内スリーブに強固に接合する。冷却水で軸方向に温度が均一化された高剛性内スリーブはサーマルクラウンを形成せず、ストリップから伝わる熱による外スリーブの熱膨張を圧縮ひずみに変えて拘束する。そのため外スリーブのクラウンも抑止される。もし、外スリーブに発生する圧縮ひずみ以上の引張りひずみを外スリーブに付与しておけば、加熱されてもひずみ量が変化するのみである。そこで実際のロールの製作では、外スリーブ全面を焼嵌めし、内スリーブに強固に接合すれば同等の効

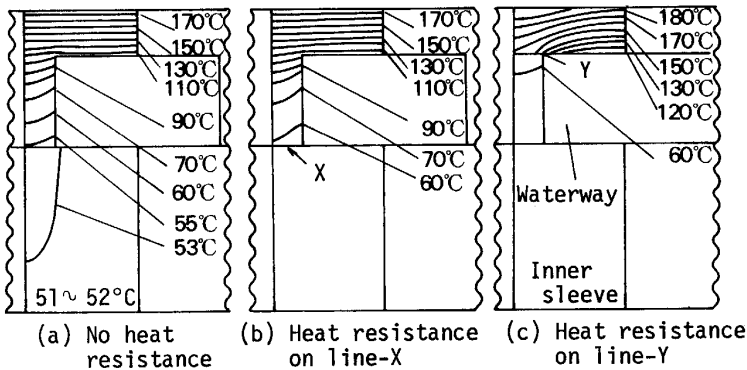


Fig. 7. Temperature distribution on the roll (cross-section).

Table 2. Calculating conditions for newly developed quenching roll.

Strip width (W)	1 000 mm
Thickness of outer sleeve (δ_1)	18 mm
Thickness of inner sleeve (δ_2)	0~400 mm
Eight screw-shaped waterways	$l_1=22$ mm $l_2=8$ mm $l_3=12$ mm
Coolant (water)	18 t/h
Strip temperature (T_P)	800°C
Coolant temperature (T_W)	50°C
Young's modulus (E)	205 800 N/mm ²
Coefficient of linear thermal expansion of roll sleeve (α)	$1.1 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$
Thermal conductivity of roll sleeve (λ)	45.3 W/(m·K)
Heat transfer coefficient of strip/sleeve interface (α_S)	1 774 W/(m ² ·K)
Heat transfer coefficient of sleeve/coolant interface (α_W)	10 350 W/(m ² ·K)
Wrap angle (β)	π rad

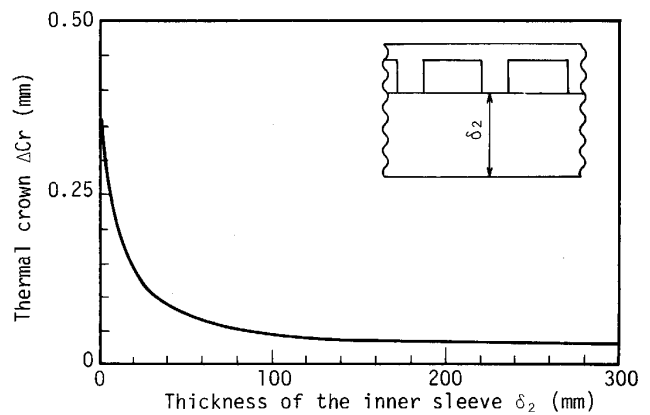


Fig. 8. Relationship between δ_2 and ΔCr .

果が期待できる。この場合、外スリーブの熱膨張は焼嵌めによる引張ひずみに相殺され、クラウンが抑止される。焼嵌めであれば機械加工精度でひずみ量が設定できロール製造時の信頼性も高い。

3.2 計算条件と解析モデル

Fig. 6 にロール形状を示す。厚さ δ_1 の外スリーブに断面 $l_1 \times l_3$ の水路が幅 l_2 の仕切で設けられている。これが厚さ δ_2 の内スリーブに結合されている。前述の計算と同様にロール半分を4節点軸対称要素でモデル化した。節点数は938、要素数は730である。ロール表面板幅内(ab)と水路に熱伝達の境界条件を与えた。節点は、ロールの幅中央(ac)で軸方向の変位を、ロール軸(ef)で径方向の変位を拘束した。計算条件をTable 2に示すが、2.1より熱的に厳しくなるように設定した。水路形状を変えてあるため同一流量でも流速が変わり α_W も異なる。

3.3 計算結果と考察

3.3.1 スリーブの温度分布

Fig. 7(a) に板幅内側のスリーブ断面の温度分布を示す。等温線はロール表面にほぼ平行で抜熱に対する仕切部の影響は小さく、熱は半径方向にのみ流れている。仕

切部を流れる熱の大部分は冷却水に伝わり内スリーブも冷却水と接しているため、内スリーブの温度上昇は水温に対して1~2°Cと小さい。仕切部の幅 l_2 を大きくするとロール表面での温度不均一が考えられ、余り大きくするのは好ましくない。

次に水路形成を外スリーブとするか、内スリーブとするかについて考察する。Fig. 7(b), Fig. 7(c) に仕切部のXまたはYの箇所に α_S に相当する熱抵抗を仮定した場合の温度分布を示す。Fig. 7(b) の場合、Fig. 7(a)と比較して外スリーブの温度分布の変化が小さいが、Fig. 7(c) では、外スリーブの温度が高まる。2重スリーブのロールを製作すると接合部で熱抵抗が避け難く、外スリーブの内面に溝を切り仕切部まで一体化する方式が抜熱に対して有利である。溝を有する内スリーブと薄い外スリーブの組合せでは、低温度の仕切部と分離した外スリーブは平均温度が相対的に高まり、焼嵌めが緩みやすい傾向にあるため、外スリーブの内面に水路を設けることが望ましいと考えられる。

3.3.2 サーマルクラウン抑止効果

Fig. 8 に内スリーブ厚 δ_2 とクラウン量 ΔCr の関係を示す。Fig. 7(a) に示す温度分布において、内スリーブが外スリーブの熱膨張を拘束するため ΔCr は大幅に

低減できる。δ₂ が 0 mm, すなわち内スリーブの拘束が無いと ΔCr は 0.43 mm であるが, δ₂ が 22 mm と外スリーブと同程度であれば ΔCr は 30% に低減する。更に肉厚を大きくするか, 中実とすると ΔCr は 7% まで低下し実質上サーマルクラウンを抑止できる。

Fig. 9 に外スリーブの熱変形を示す。水路部の薄い部分が凸に変形するが, Table 2 の条件では 2.5 μm で実質上問題にならない。

焼嵌めでロールを製作する場合, 拘束無しでは外スリーブが半径当たり 0.43 mm 膨張するため, 焼嵌め代を半径当たり 0.5 mm 程度にすれば, 外スリーブに発生する初期の引張りずみが熱膨張を相殺しサーマルクラウンを抑止できることになる。実操業では通板材の温度や幅は種々変化するが, 通板位置に対応してその部分の初期ひずみが自動的に熱膨張を吸収するので, 機械式, 油圧式等でのクラウン制御が不要となることが本方式の特徴である。

4. ストリップ冷却モデル試験

数値シミュレーションで検討したサーマルクラウン抑止効果を, モデル試験により検証した。

4.1 試験装置

Fig. 10 に試験装置の概要を, Table 3 に主仕様を示す。ストリップは, 窒素雰囲気炉中で所定の温度まで加熱された後, 実験に供される。パイオフリールから巻き

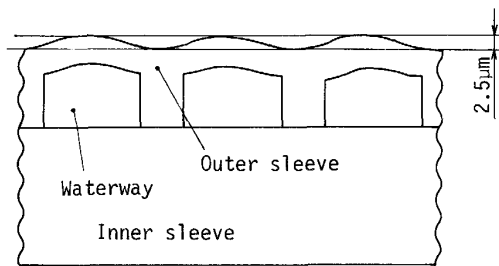


Fig. 9. Outer sleeve deformation.

出されたストリップは, ブライドルロールによって通板張力を高められ冷却ロール群に送られる。ここで冷却されたストリップは, テンションロールを通過した後テンションリールで巻き取られる。冷却試験部分は, 放射温度計に対する外乱光防止のためにフードで覆われているが, 大気雰囲気である。

4.2 冷却ロール

Fig. 11 に実験に用いた冷却ロールの構造を示す。外スリーブの内面に 2 条の螺旋水路を切り, 内スリーブに焼嵌めした。冷却水はロールの両端から供給し, 二本の水路を互いに逆向きに流す。ロール径はモデル比 (1/5) から 200 mm とした。本ロール構造の抜熱やクラウン抑止を評価するために外スリーブ厚を実機と同寸法とし, (3)式¹¹⁾で示される熱通過率 K を等しくすることによってスリーブに形成される温度分布を実機想定により近づけるようにした。

$$1/K = 1/\alpha_s + \delta/\lambda + 1/\alpha_w \dots\dots\dots(3)$$

ロール冷却では, ロールの表面状態によって熱伝達は変化し, 粗度が小さいほど大きい²⁾。また, 上流ほどロールとストリップの温度差が大きく, ストリップは冷却されやすい。それぞれのロールで冷却速度を近づけ抜熱を均一化するために, プラスト加工 (R max = 30, 50, 100, 140 μm) または機械加工 (R max = 0.5, 5.5, 8.5, 50, 100, 200 μm) を施したロールを, 上流側の粗度を高めるように適宜組み合わせた。

4.3 実験方法

0.1~0.4 mm 厚 × 200~400 mm 幅の SPCC ストリップを供試材として実験を行った。通板速度は, 0.15 mm

Table 3. Specifications of experimental apparatus.

Model ratio	1/5
Line speed	0~230 m/min
Line tension	500~5 500 N
Heating temperature	max. 700°C
Strip thickness	0.1~0.4 mm
Strip width	200~400 mm

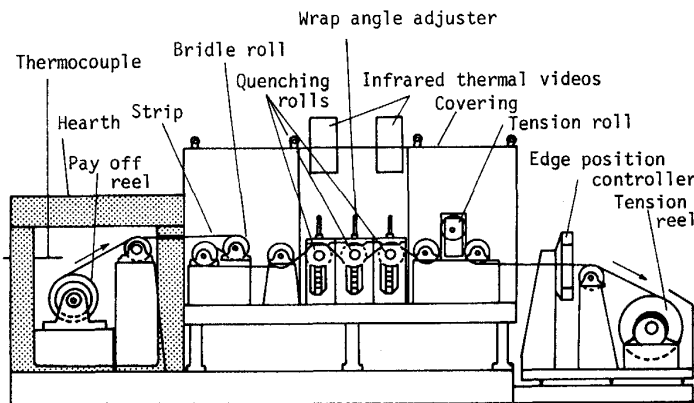


Fig. 10. Experimental apparatus (1/5 scale).

厚材で 100 m/min を基準とした。冷却水量を 1 本当たり 6~20 l/min とし、冷却開始温度を 500~700°C とし、3 本のロールで冷却した。ここで、1, 3 番ロール上でのストリップの温度変化を赤外線放射温度計で測定し、テンションリール巻取り直前の板形状と対比した。

4.4 実験結果と考察

4.4.1 試験ロールの均一冷却効果

Photo. 1(a) に 0.1 mm 厚 × 280 mm 幅の平坦なスト

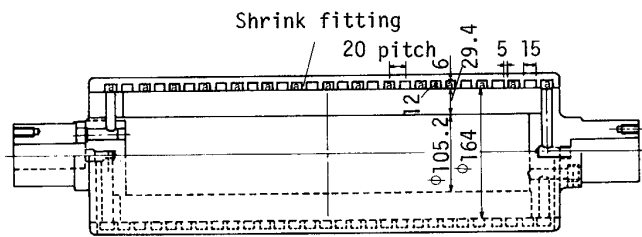
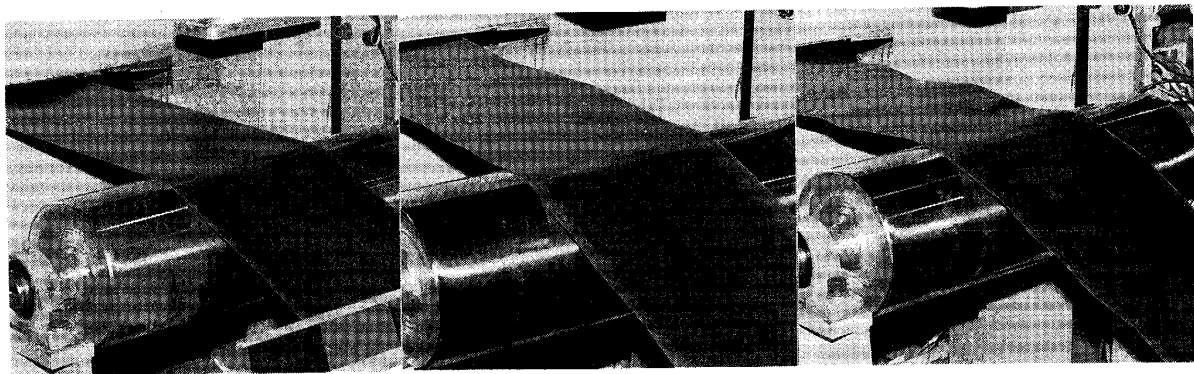


Fig. 11. Tested quenching roll (φ200, 1/5 scale).

リップを速度 150 m/min, 張力 40 N/mm² で通板し 650°C から 450°C まで冷却した場合の巻取り直前形状を示す。粗度は上流から $R_{max} = 140 \mu\text{m}$ (プラスト加工), $100 \mu\text{m}$ (プラスト加工), $200 \mu\text{m}$ (機械加工) の組合せで、巻付角度はそれぞれ $\pi/4$ rad である。この時、ストリップの幅方向温度の経時変化を 1, 3 番ロール上で測定した。結果を Fig. 12(a), (b) に示す。形状不良は発生しておらず、幅方向の温度分布もかなり均一である。ロール上では、1400~2000°C/s で冷却された。中伸びや絞込みの発生もなく、サーマルクラウンが抑制されていると考えられる。

Photo. 1(b) にロール粗度を 8.5 μm 以下で組み合わせ、巻付角度を $\pi/4$ rad とし 0.15 mm 厚 × 280 mm 幅のストリップを速度 100 m/min, 張力 9.8 N/mm² で冷却した場合に発生した鱗状の平坦不良を示す。粗度が小さいため急冷となりロールへの押圧が小さいので不均一



(a) Flat strip (0.1^t x 280^W) (b) Fish-scale flatness defect strip (0.15^t x 280^W) (c) Edge wave strip (0.15^t x 280^W)

Photo. 1. Shape of cooled strip.

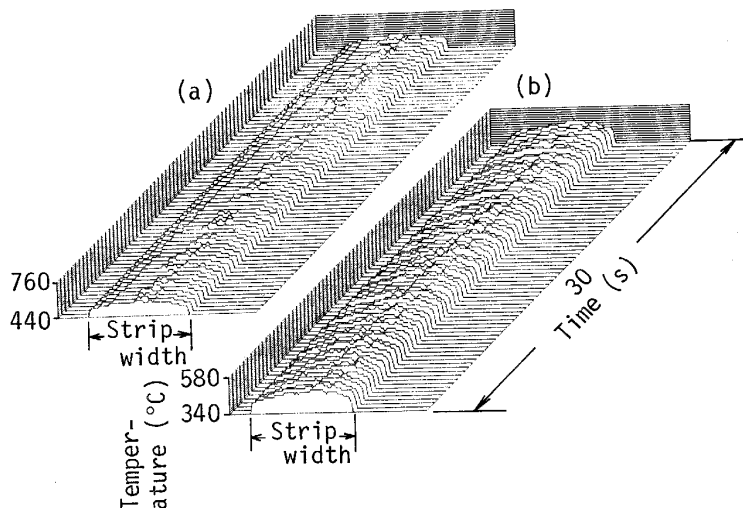


Fig. 12. Transversal temperature distribution of the flat strip.

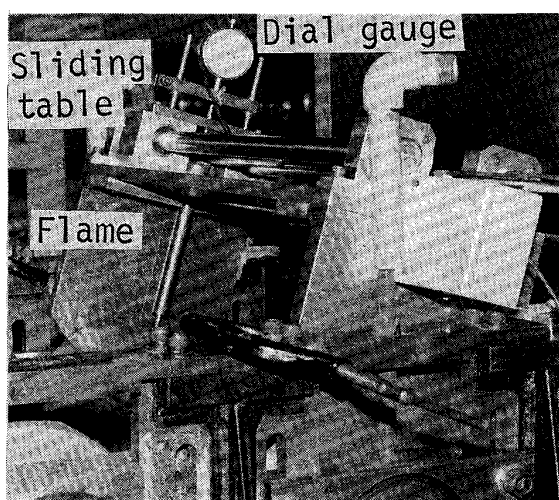


Photo. 2. Measuring device for thermal crown.

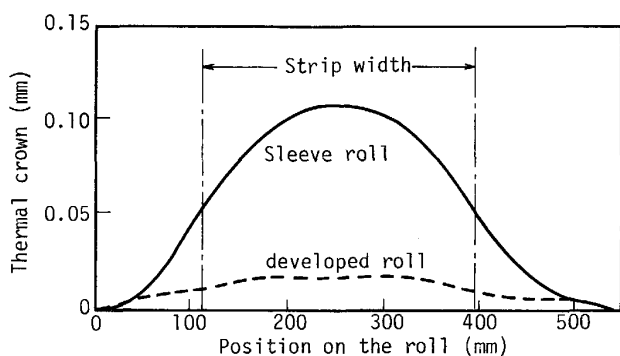


Fig. 13. Comparison of thermal crown induced in sleeve roll and developed roll.

な冷却となったと推察される。張力を高めると発生しないので、張力による拘束の効果が大きいことが判明した。

Photo. 1(c) に入側で耳波を有するストリップ (0.15 mm 厚 × 280 mm 幅) の冷却後形状を示す。冷却が不十分な端部の温度が高く、更に大きな耳波を形成した。母材の平坦を確保することが肝要である。

4.4.2 サーマルクラウン実測

Fig. 11 のロールとスリーブの厚さを 18 mm とした同材質の中空のロールを用いて、サーマルクラウンを比較した。300°C のストリップを一定時間走行させロール表面を加熱、内部を同一流量の水で冷却し、Photo. 2 に示す治具でサーマルクラウンを測定した。ロール両端のネック部に乗るフレームにスライドテーブルを設け、そこにダイヤルゲージを固定してある。Fig. 13 にダイヤルゲージを動かしてクラウンを直接測定した結果を示す。中空ロールが水路を有しない点の影響もあるが、クラウン量で 16%、板幅当たりクラウン量では 10% 程度と

なっており、本ロールのクラウン抑止効果が確認できた。

4.4.3 実機での冷却との対比

ロールとストリップの接触面を単位面積、単位時間に通過する熱量 q は板厚 t 、板幅 W 、ロール径 D 、比熱 C_t 、密度 γ 、通板速度 V 、ストリップの冷却温度 ΔT を用いると(4)式となる。

$$q = \frac{V \cdot t \cdot W \cdot C_t \cdot \gamma \cdot \Delta T}{\beta \cdot (D/2) \cdot W} = \frac{2 V \cdot t \cdot C_t \cdot \gamma \cdot \Delta T}{\beta \cdot D} \quad (4)$$

実機の場合、板厚・板幅・ロール径をモデル比とし、巻付角度と通板速度を同一に設定する。冷却水量を、モデル比の 2 乗 (板厚比 × 板幅比 × 速度比 (=1)) として熱通過率 K をモデルと実機で近似させれば、 q が等しくなるためロールに対する熱負荷も同様になると考えられる。板厚、板幅・ロール径をモデル比としてあるためストリップの絞込みやすさも同等と考えられる。ただし、ストリップの冷却温度 ΔT が実験結果に等しくストリップに発生する熱ひずみが相似になったとしてもロールとの接触時間が異なるためストリップの冷却速度は同一にならない。本実験では実機に比して 5 倍の冷却速度になり、ストリップに対する抜熱条件はその分きびしいが平坦を確保できた。

5. 結 言

ロール冷却においてストリップの均一冷却と形状不良抑止を目的として、ロールに発生するサーマルクラウンを評価し、それを抑止する新しいロール構造を提案した。数値解析によって効果を検討するとともにモデル実験を行い、均一冷却実現のための基本事項を確認した。

(1) スリーブ構造の冷却ロールは板端部に大きな温度勾配を有し、スリーブの剛性のため緩やかな形状のサーマルクラウンを形成する。この凸クラウンが、板とストリップの均一接触を阻害し、張力が大きくなると形状不良を発生させる。

(2) 内面に螺旋状の水路を加工した外スリーブとロール内スリーブを強力に接合することによってサーマルクラウンを抑止でき、内スリーブの厚さを大きくするほど抑止効果は高まる。

(3) 外スリーブを内スリーブに焼き嵌めた冷却ロールを製作し機能を確認した。外スリーブの熱膨張を焼嵌めの初期ひずみが相殺しサーマルクラウンが抑止される。

(4) 冷却ロール入側で平坦を確保したストリップを新構造ロールで冷却することによって、形状不良を発生させない高速冷却が行えた。高温域で張力を高めても、凸

クラウンに起因する絞込みは発生しないので、薄手広幅材に対しても有効である。

記号

D : ロール径 (mm)
 E : スリーブのヤング率 (N/mm^2)
 K : 冷却ロールの熱通過率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
 L : 冷却ロール長さ (mm)
 T_S : ストリップ温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_W : 冷却水温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 W : 板幅 (mm)
 a_W : 冷却水の温度伝導率 (m^2/s)
 d_{eq} : 冷却水路の相当直径 (m)
 l_1 : 冷却水路幅 (mm)
 l_2 : 冷却水路仕切幅 (mm)
 l_3 : 冷却水路深さ (mm)
 u : 冷却水流速 (m/s)
 α : ロールの線膨張係数 (K^{-1})
 α_S : ロール・ストリップ間の熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
 α_W : ロール・冷却水間の熱伝達率 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
 β : ストリップの巻付角度 (rad)
 δ : スリーブ厚さ (mm)
 δ_1 : 外スリーブ厚さ (mm)
 δ_2 : 内スリーブ厚さ (mm)

λ : ロールの熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
 λ_W : 冷却水の熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
 ν_W : 冷却水の動粘性係数 (m^2/s)

文献

- 1) 苗村 博, 福岡嘉和, 実川正治, 下村隆良: 鉄と鋼, **65** (1979), S 840
- 2) S. FUKUDA, N. YOSHIHARA, Y. OHKUBO and S. TAKUSHIMA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **24** (1984), p. 734
- 3) 吉原直武, 福田修三, 上野 康: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 839
- 4) 滝沢謙三郎, 伊藤重晴, 大蔵峰樹, 岩谷二郎, 永井克弘, 川田昭二: 鉄と鋼, **71** (1985), S 1181
- 5) 伴 誠二, 伊藤重晴, 岩谷次郎, 大蔵峰樹, 岡野正之: 鉄と鋼, **70** (1984), S 1061
- 6) 佐々木徹, 比良隆良, 阿部英夫, 柳島章也, 下山雄二, 田原綾一: 川崎製鉄技報, **16** (1984), p. 37
- 7) 的場 哲, 阿高松男: 鉄と鋼, **72** (1986), S 1250
- 8) 総田良之, 益居 健, 小峰一見: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1552
- 9) 日本国公開特許公報, 昭和 59-117913
- 10) 総田良之, 益居 健, 磯野哲夫: 材料とプロセス, **4** (1991), p. 569
- 11) 内藤秀雄: 伝熱工学 (1985) [裳華房]