
ロ　ー　ル　特　集

熱間圧延用ワークロールのかみどめ熱き裂……………59

ホットストリップミル仕上前段用ワークロールの問題点

——ホットコイルの流星きずとロールの肌荒れについて——……63

超大形鋳鋼製厚板補強ロールの製造……………68

4重圧延機用補強ロールの適正研磨量の決定に関する一考察……………72

熱間圧延用ワークロールのかみどめ熱き裂

Honeycomb-cracks by Seizing on the Work Rolls in Hot Rolling

関本 靖裕*
Yasuhiro Sekimoto

杉村 幸彦*
Yukihiko Sugimura

平田 一雄*
Kazuo Hirata

要 旨

熱間圧延用ワークロールのロール原単位をさげるためには、ロールの品質向上と使用中の改削基準を明確にしておくことが必要である。熱間圧延ではしばしばモータへの過負荷によって圧延材をロールギャップにかみこんだまま圧延が停止する現象がある。そのときロールの圧延材と接触した面には熱き裂が発生する。このような圧延に遭遇したロールは損傷度によって異常改削をうける。この研究はかみどめ熱き裂を実験室的に再現させ、熱き裂の発生条件と深さについて検討し、これらの結果から適正改削量について付言したものである。

1. 緒 言

最近の圧延製品の生産高は順調な伸びを示している。一方、圧延工場においては圧延製品のコスト低減が重要な問題となってきた。これに対処するためには圧延用ロールの寿命をのばすことが肝要で、高性能ロールを使用すること、および使用時の適正な改削量基準を確立することが必要である。

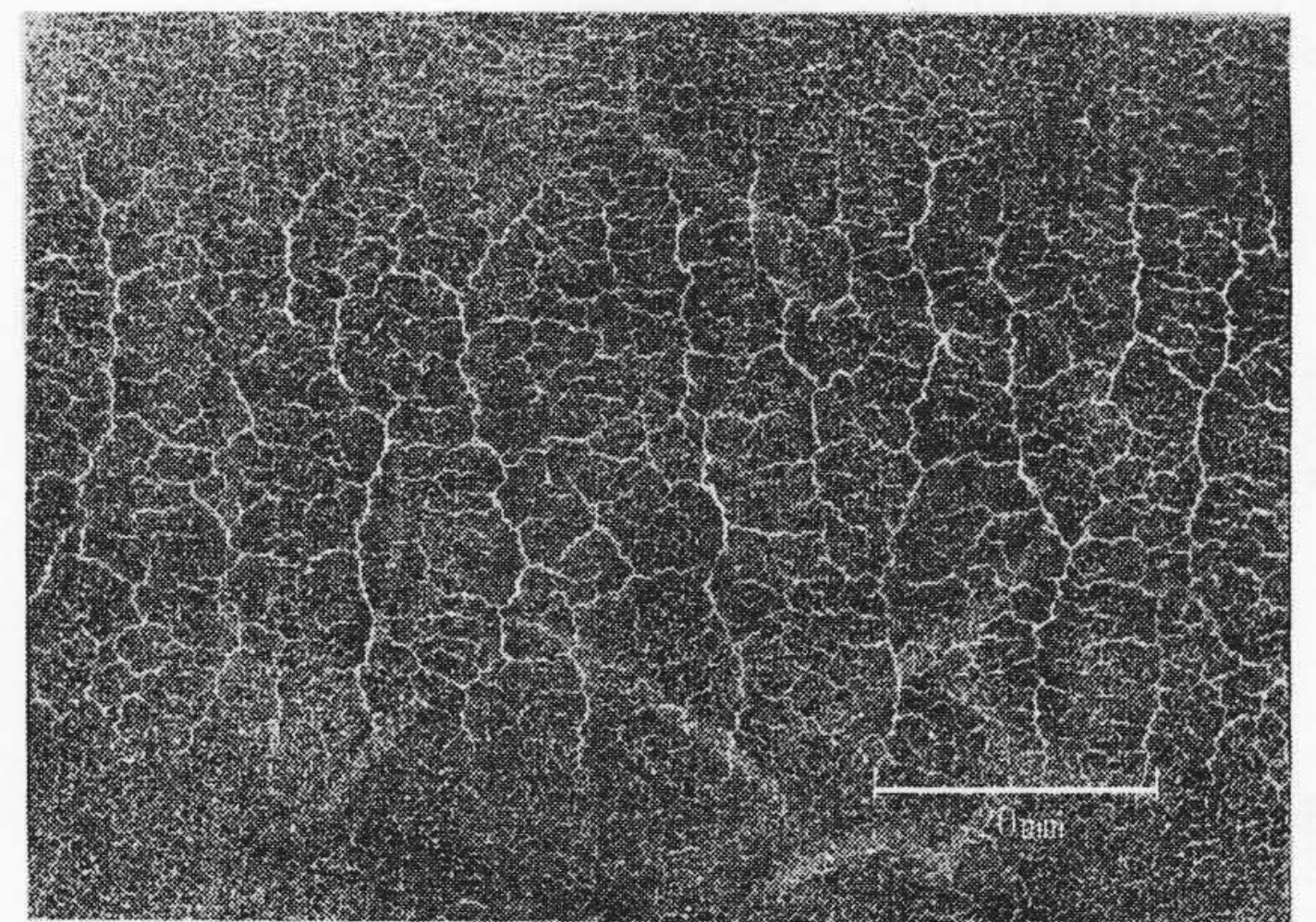
熱間圧延用ワークロールは過酷な熱的機械的負荷の条件下で使用されるので、一定量圧延したあとロールは組降される。そして、必要な量だけ改削した後再使用される。圧延中に生じたロール事故はもちろん、異常圧延によってロールにひどい損傷が生じた場合は、ロール表面のきずを除去するために異常改削される。これがロール原単位増加の大きな原因となる。正常圧延時のロール組換と改削基準は圧延状況によって変化する。改削基準に対する基本的な考えは、圧延製品肌に影響を及ぼさないようにロール表面の熱的機械的疲労損傷層を除去することであろう。異常圧延によるロールの損傷例として次のものがある。モータに過負荷電流が流れ、圧延材をロールギャップにかみこんだまま圧延が停止するときにロール表面に発生するかみどめ熱き裂。圧延材が折れ重なってロールギャップにはいったときにロール表面に発生する絞りこみき裂、あるいはスポーリング。異物をかみこんだときにロール表面に生ずる押しきずなど。

この報告は熱間厚板四重圧延機におけるかみどめ熱き裂を対象とし、実験室的に実際に類似した熱き裂を再現させ、かみどめ時の熱き裂の発生条件と深さについて検討したものである。なお、これらの結果からかみどめ熱き裂の適正改削量についても触れることにする。

2. かみどめ熱き裂

熱間圧延におけるかみどめは、ロールギャップ調整の不備、圧延材の温度低下、圧延材の寸法大などが原因であるといわれている。停電などの突発的原因によるものでなければ、かみどめ時間は比較的短く数秒の場合が多い。圧延材がロールギャップにかみこんだまま圧延が停止したとき早急にセルシンを戻す操作が行なわれるが、その間水冷を中断しないのが普通である。最近、新設されているミルのなかにはかみどめ時の過負荷を自動的に吸収する方法を採用しているものがある。

図1は熱間厚板四重圧延機において、圧延中かみどめ状態になり圧延材と接触してワークロール胴部表面に発生した熱き裂である。かみどめ時の圧延材温度は960℃、水冷は中断することなく行なわれていた。使用ロールは高合金グレーンロールであった。この熱き



—— ロール軸方向 ——→

図1 かみどめ熱き裂

裂について調査した結果を述べる。

熱き裂のパターンは幅50mm、長さ2,420mm(ロール軸方向)であった。図1はロール表面の損傷をフィルムレプリカ法で転写したもので明暗は逆になっている。かみどめ熱き裂は一見モザイク状模様を呈している。熱き裂の上側と下側に認められる微細なクラックは正常圧延時に発生したヘアクラックでその深さは浅い。図2は熱き裂をグラインダで研削した後カラーチェックを施し写真撮影したものである。改削するにつれて軸方向クラックは消滅し、円周方向のクラックが残存することが認められる。これはかみどめ時ロール表面付近に発生する熱応力の表面から内部にいたる応力こう配が軸方向と円周方向とで差ができるために生ずる現象であろうと考えられる。図3は改削後のカラーチェック面においてロール軸方向に100mmの直線を引き、これと交差する円周方向のクラック数と片肉改削量との関係を図示したものである。図2と図3からモザイク状のクラックは片肉1mm以内で完全に除去されることが認められる。円周方向のクラック数は改削量に比例して少なくなり、この例では片肉2mm程度で熱き裂は消滅するものと推定される。各改削面においてかたさ測定と組織観察を行なったが、図4はロール表面からの距離とかたさとの関係を示したものである。かたさ測定にはD形ショアー硬度計を使用した。表面から0.1mmのところまではかたさが低下しており、真の値を示していないことが認められる。表面から0.1mmまでは圧延肌が残留しており、この部分は圧延によって生じた熱疲労層であると考えられる。熱き裂の深さは一般にかみどめ時の圧延条件とロール材の耐熱特性によって変化する。

3. 熱き裂試験

熱き裂の発生条件を明らかにするためにロール材の熱き裂試験を

* 日立金属株式会社若松工場

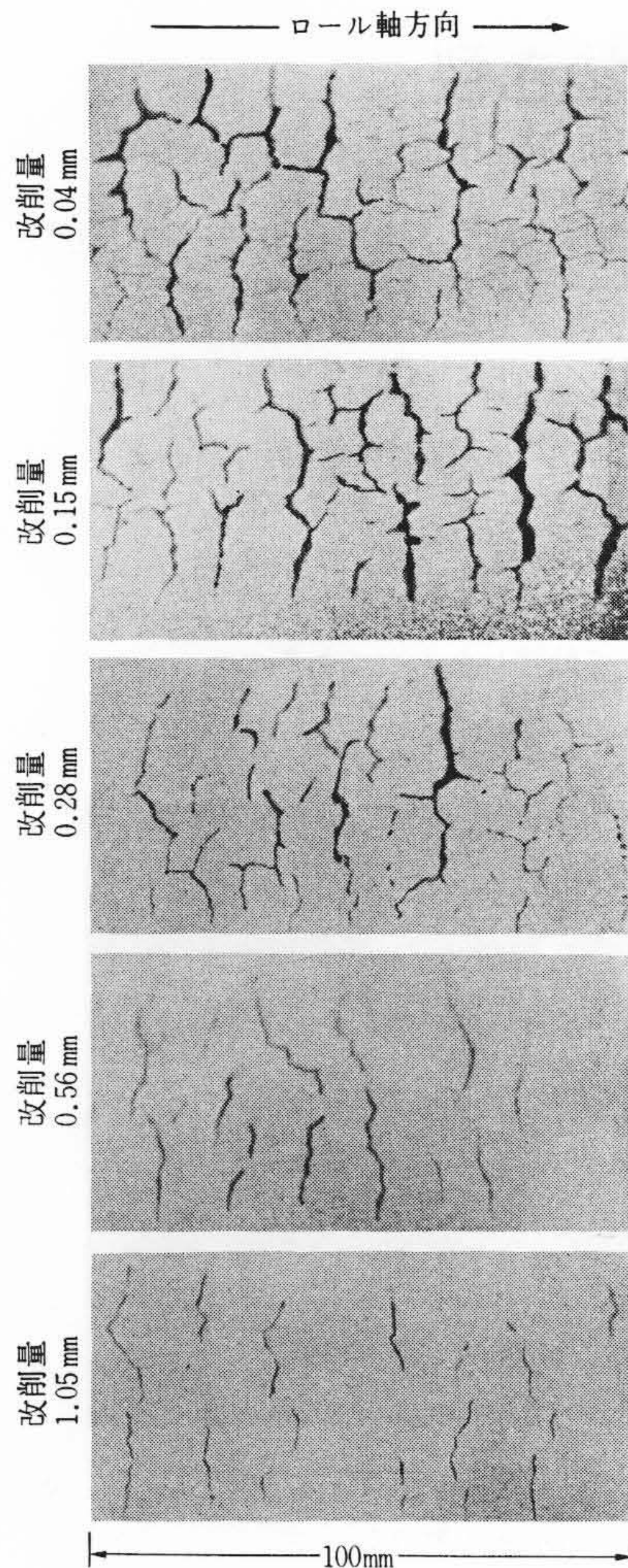


図2 残留クラックのカラーチェック結果

行なった。試験に際しては加熱条件と冷却条件を定め、試料の温度分布と熱き裂深さを測定した。

3.1 熱き裂の発生方法と試験条件

供試材は直径 930 mm, 胴長 3,353 mm の厚板用高合金 グレーンロールの表面部から採取した。試料寸法は直径 38 mm, 長さ 40 mm の円柱形である。

図5に試験装置の略図を示す。試験はプロパンガスと酸素の混合ガス炎で試料端面を加熱し、試料表面が所定の温度になったとき加熱面を急冷して熱き裂を発生せしめた。加熱条件を一定にするために混合ガスの流量を流量計で調整し、かつ炎長さを定めた。予備実験において試料の加熱面から 2 mm, 4 mm, 8 mm のところにおける温度を銅—コンスタンタン熱電対をそう入して測定した。試料表面の温度はテンピルスティックで测温した。

図6に加熱時における試料の昇温曲線を示す。試料表面の温度は1分後で 400°C, 2分後で 500°C, 3分30秒後で 600°C に達した。試料表面の温度こう配は 65~85°C/mm で実際のかみどめ時の条件に類似せしめた(4. 参照のこと)。加熱後の冷却方法として (i) 試料端面を流動水に接触させて冷却する。(ii) 静止した水に接触させて冷却する。(iii) エアコンプレッサによる吹霧冷却。(iv) 衝風冷却。(v) 自然放冷。などの5種を採用した。熱き裂試験の条件として加熱時間を1分, 2分, 3分の3段階に選び、各温度について加熱後上述の5種類の冷却を行なった。

3.2 試験結果

図7に熱き裂試験後のき裂パターンをスケッチで示す。衝風冷却と自然放冷の場合は熱き裂が発生しなかったので省略した。き裂の

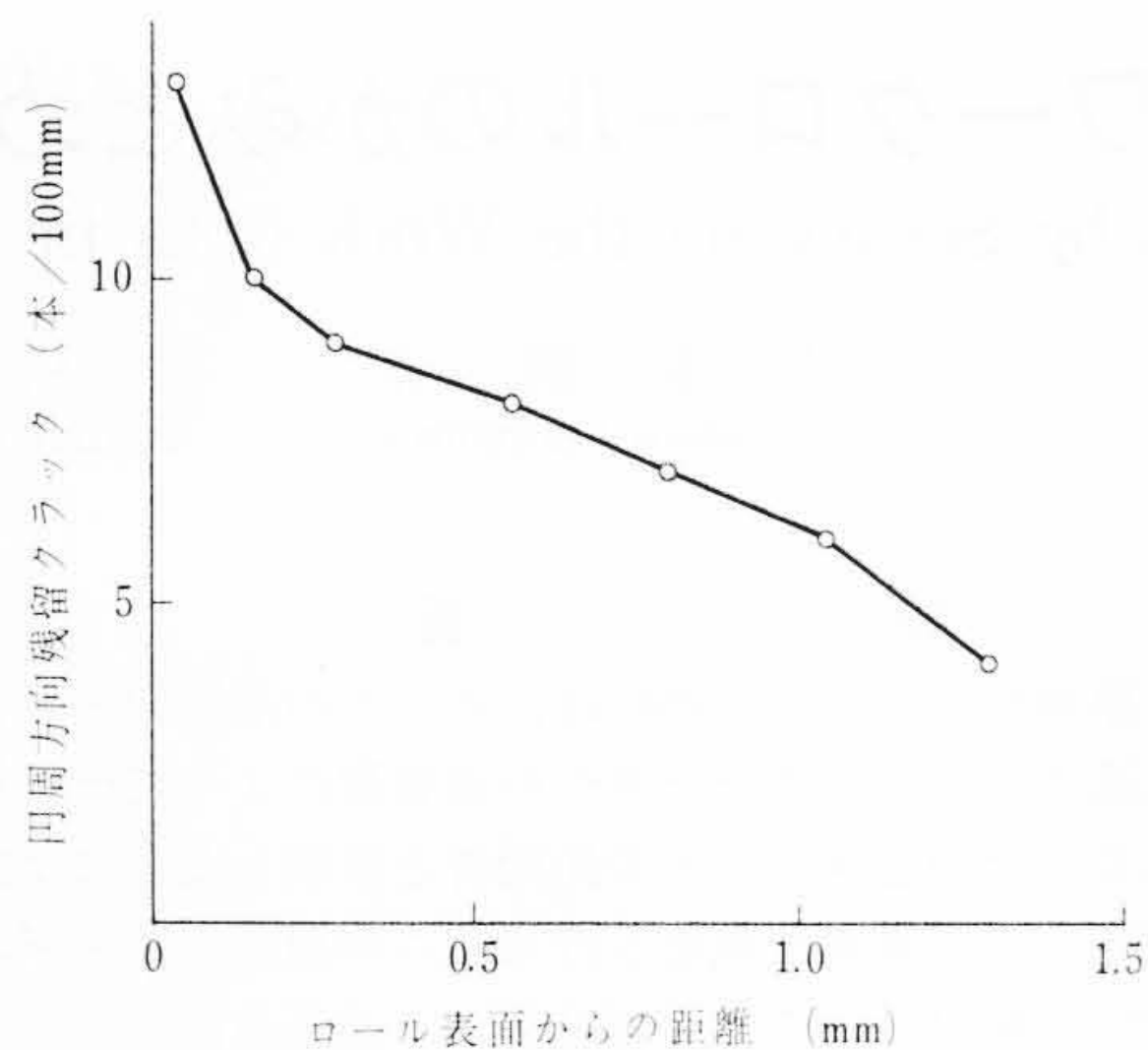


図3 改削量と円周方向クラック数の関係

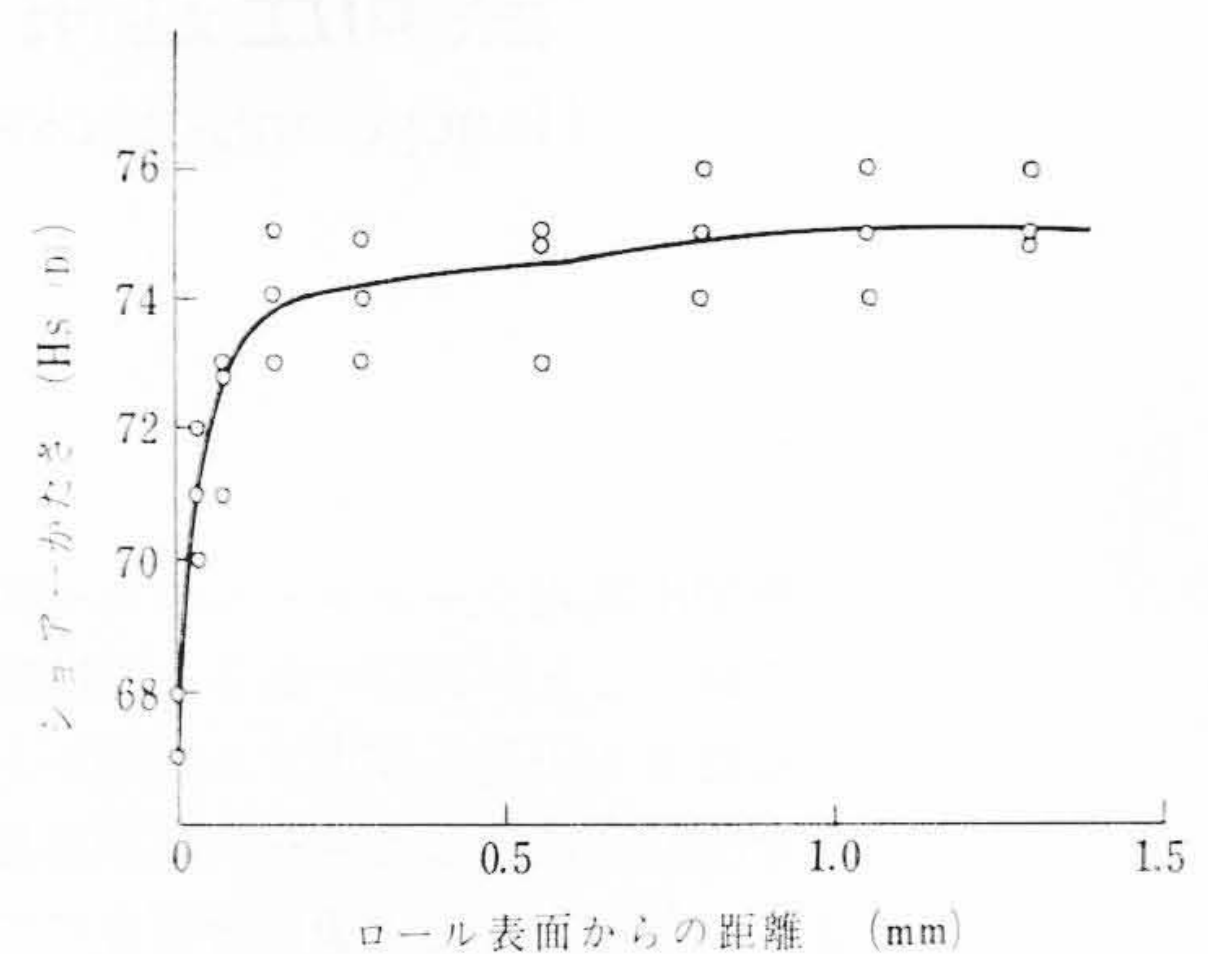


図4 改削量と硬度の関係

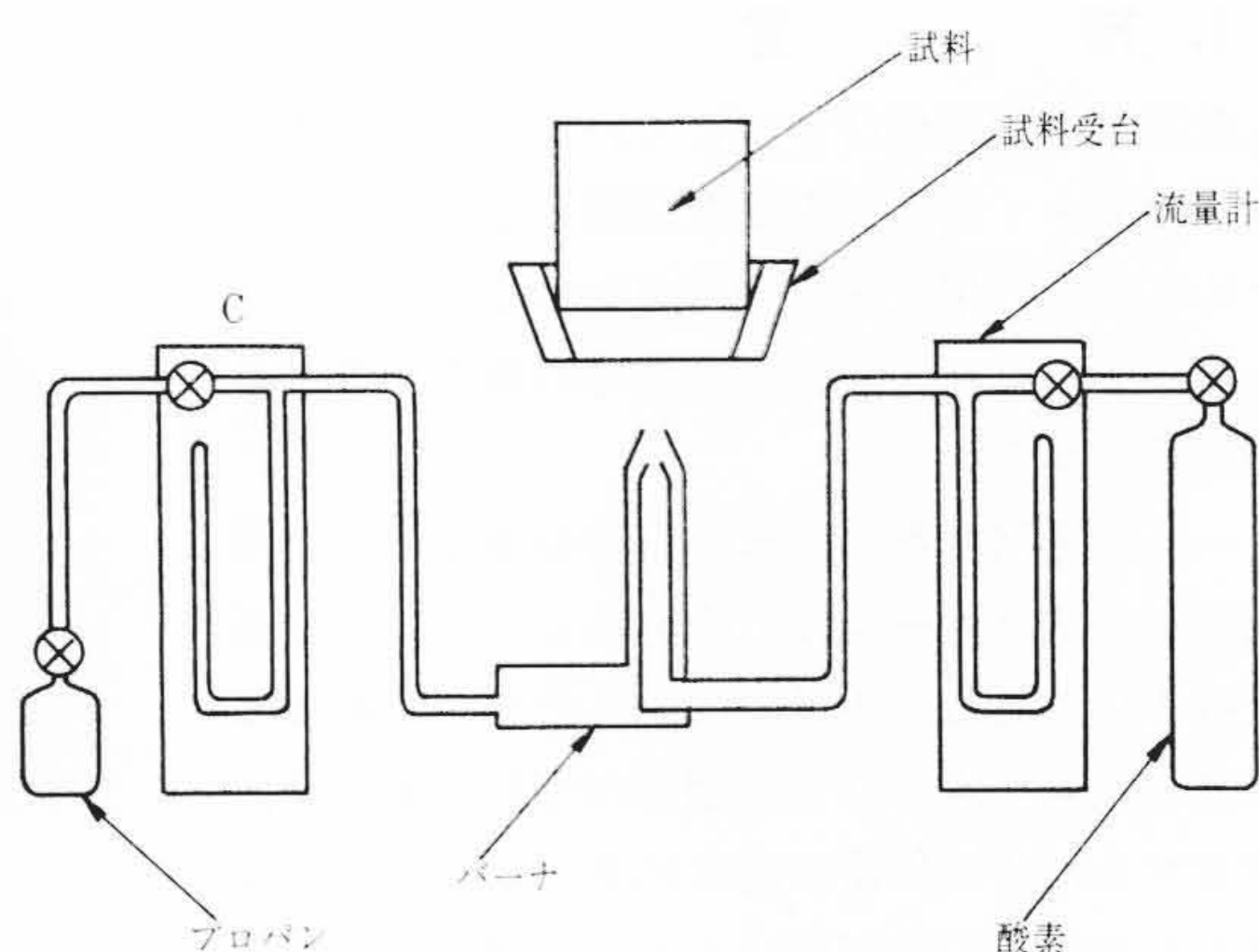


図5 試験装置

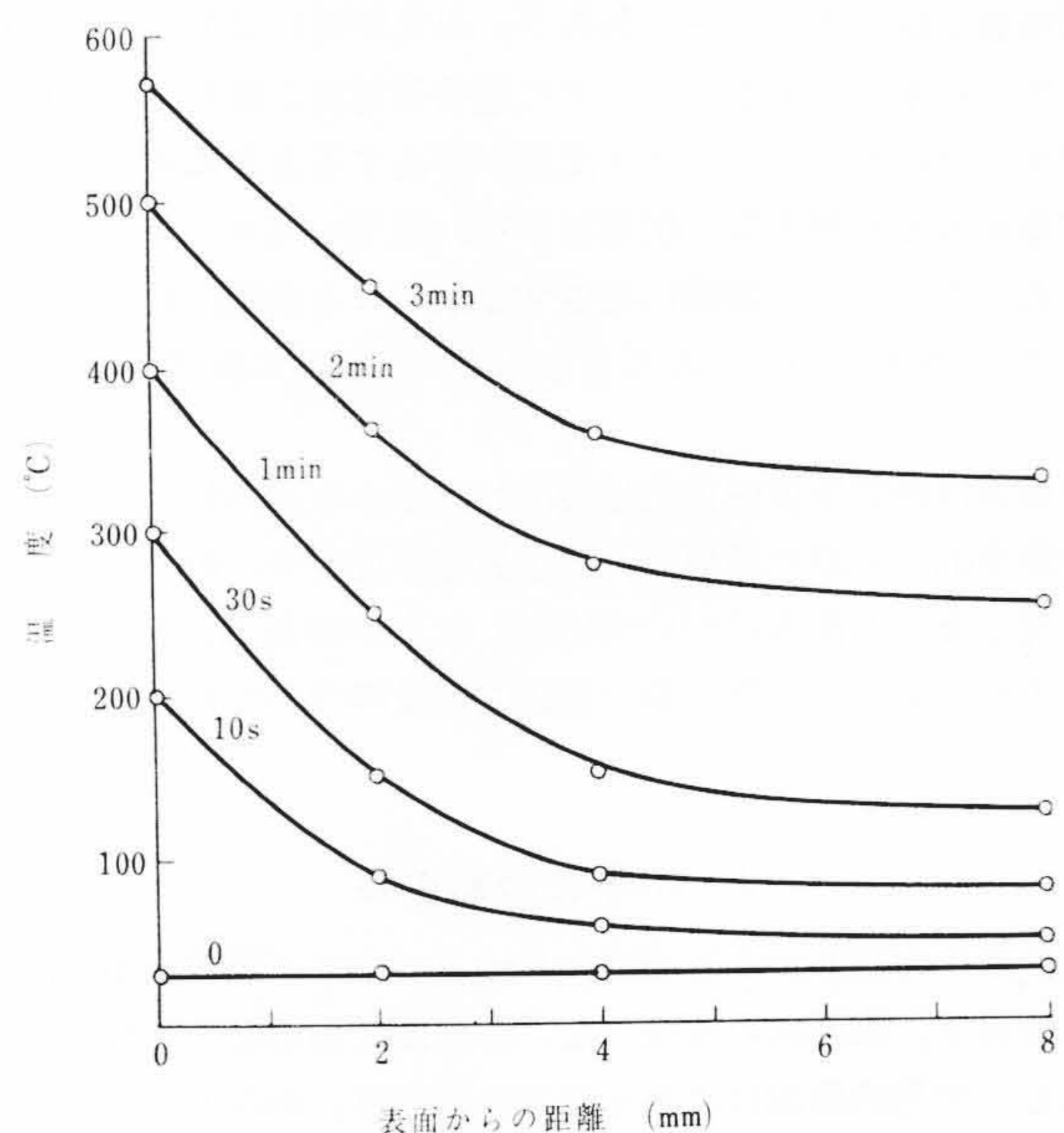


図6 試料の昇温曲線

発生したものについては試料中央を放電切断し、き裂深さを測定した。図7の結果から、高合金グレーンロール材では加熱温度が 500°C 以上になると熱き裂が急激に発生することがわかる。これらの試料のき裂深さは 1.5~2.5 mm の範囲であった。

次に、ガス炎を調整し所定の表面温度に達するまでの加熱時間を変化させ、その後流水冷却を行なった。加熱速度を変化させることにより高温加熱層深さがかわる。加熱温度は 500°C にした。図8は加熱時間による熱き裂パターンの変化を示したものである。表面の

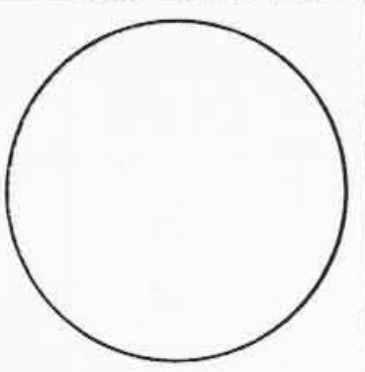
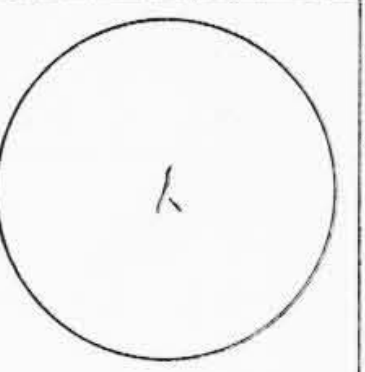
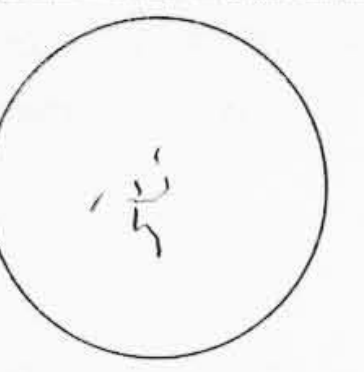
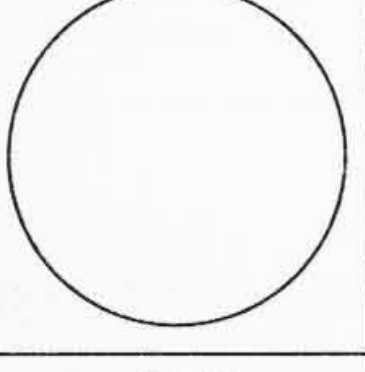
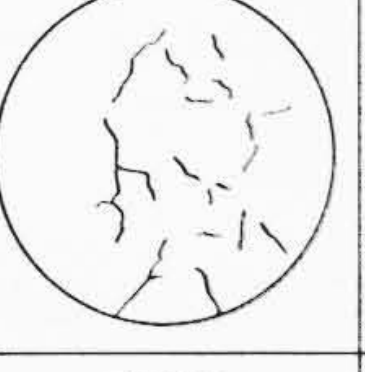
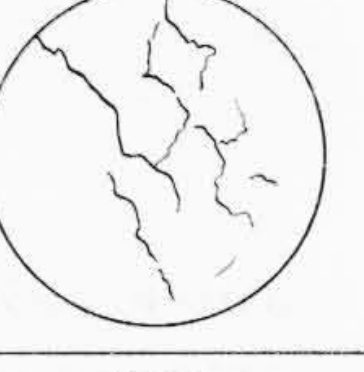
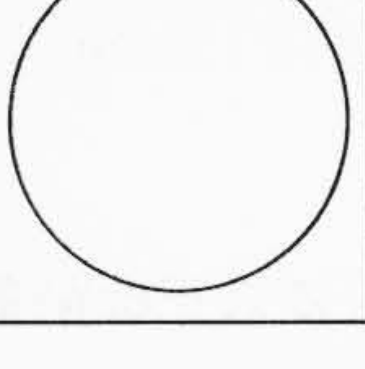
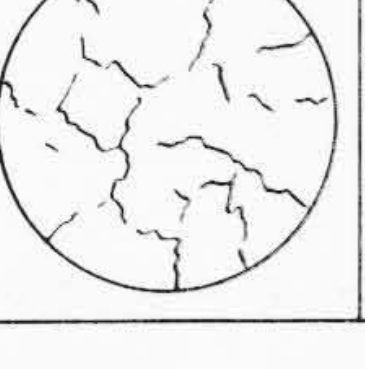
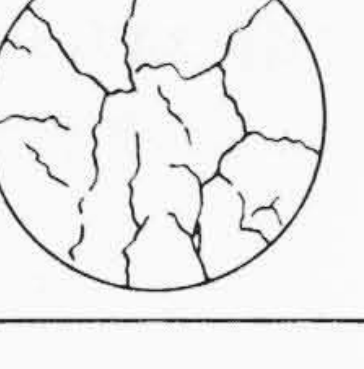
加熱条件	冷却条件	吹霧冷却	静水冷却	流水冷却
1分加熱 (表面温度 400°C)				
2分加熱 (表面温度 500°C)				
3分加熱 (表面温度 570°C)				

図7 熱き裂試験によるき裂パターン (その1)

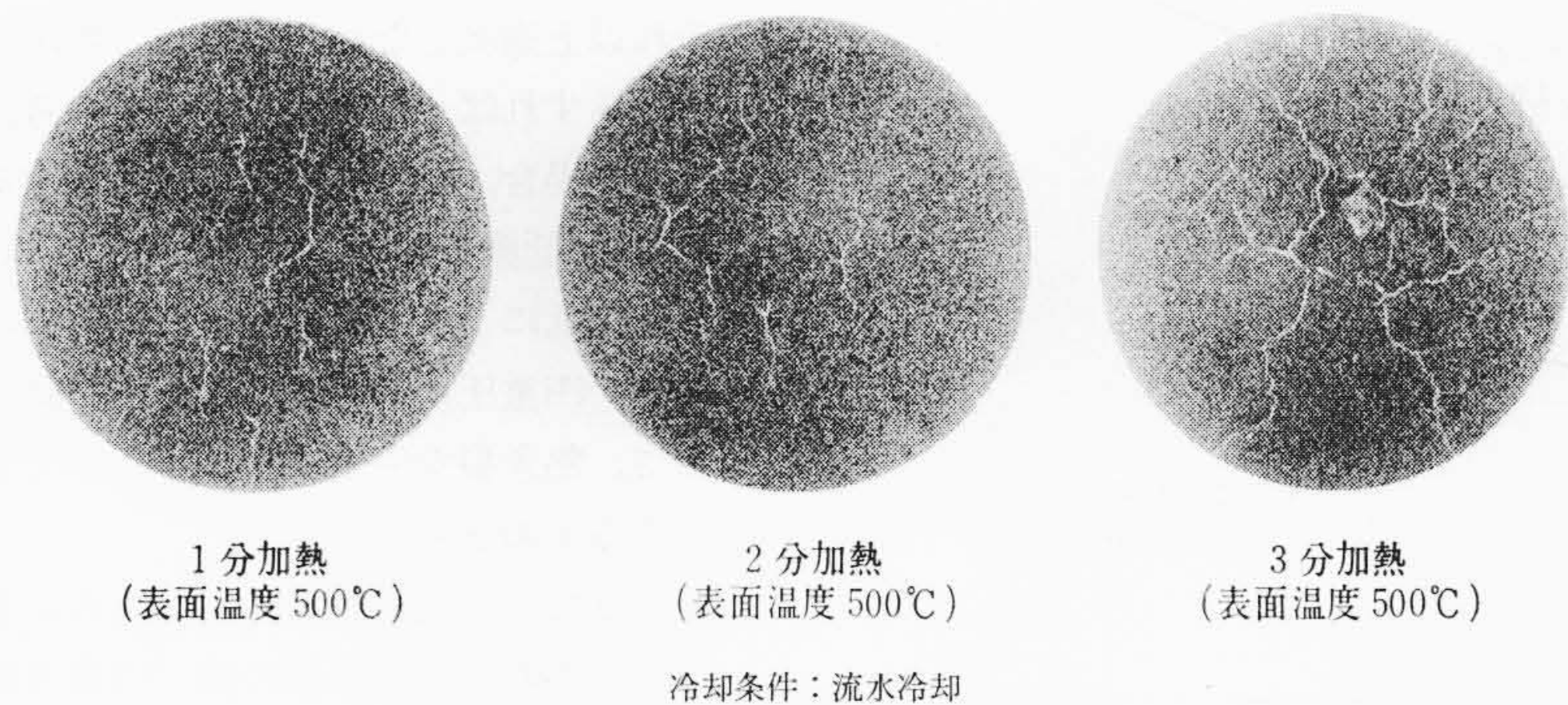


図8 熱き裂試験によるき裂パターン (その2)

最高到達温度が同じである場合、加熱時間が長いほうが深い熱き裂が発生する。

以上の熱き裂試験の結果から、急熱急冷による熱き裂は冷却条件が一定であれば加熱温度が高く、かつ表面部の高温加熱層が深いものほど深いこと、加熱面を直接水冷しないような冷却条件の場合は熱き裂が発生しないことなどが明らかになった。

3.3 熱き裂の発生条件

熱き裂の発生条件は材料の耐熱衝撃性によって変化する。3.2の試験において、き裂深さに対応する点の冷却直前における加熱温度を図6から求めその結果を表1に示す。たとえば、2分加熱後水冷したときのき裂深さは1.5~2.2 mmであり、水冷直前の試料温度は表面から1.5 mm以内は395°C以上、表面から2.0 mm以内は375°C以上であったことを示す。表1から高合金グレーンロール材の熱き裂発生条件として一応加熱温度限界を400°Cと仮定する。この温度は急加熱急冷時における試料の臨界熱衝撃温度であると考えられることができる。

熱き裂の深さは熱衝撃時に発生する最大応力値とそのこう配に係る。試料表面の上昇温度が材料の臨界熱衝撃温度以上になると熱き裂が発生し、臨界熱衝撃温度以上になる高温層が深くなるほど深い熱き裂が発生することになるが、図7と図8の結果はそれを裏付けている。加熱後の冷却方法のうち、水冷以外の場合は熱き裂が発生しなかった。これは冷却条件によって試料表面の熱伝達係数が変わり、き裂発生条件を満たすだけの温度降下が試料表面に生じなかったためであると考えられる。

熱き裂発生条件を仮定したとき、表1からわかるように10%程度の温度範囲があった。この要因として、試験時の温度条件の誤差、き裂先端の応力集中と材料の強さのバラツキなどが考えられる。

表1 熱き裂深さと加熱温度の関係

加熱時間 (min)	熱き裂深さ (mm)	水冷直前におけるき裂深さに対する点の温度 (°C)
1	<0.1	400
2	1.5~2.0	395~370
3	2.0~2.5	450~420

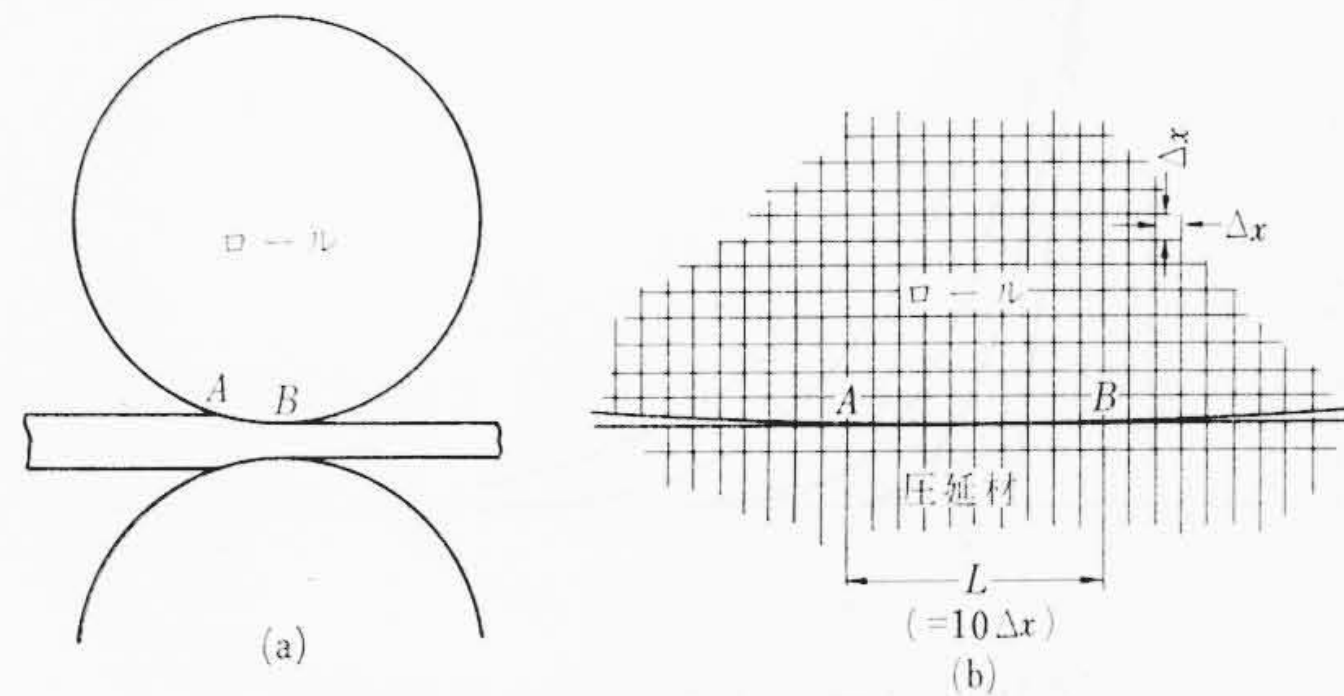


図9 かみどめ現象のモデル

4. かみどめ時におけるロール表面の高温加熱層

正常圧延時のロール表面は圧延材と接触した際高温になり、離れると水冷されるという加熱冷却のくり返しをうけるためにロール表面には熱疲労層が発生する。この場合、ロール表面と圧延材との接触時間が短く圧延材からの熱はロール内部へ深く浸透しないうちに水冷されるので、ロール表面に発生する熱疲労層は浅い⁽¹⁾。しかし、かみどめ圧延に遭遇した場合、数秒間ロール表面が圧延材と接触したままロールの回転が停止するのでロール表面付近はかなり深くまで加熱される。その後水冷されるためにロール表面には深い熱き裂が発生する。この熱き裂は3.3で述べたように加熱層深さに関係すると考えられるので、この点について検討した。

図9(a)は圧延材がロールギャップにかみこんだ状態を示したもので、圧延材の熱はロールと圧延材との接触面からロールに移動する。ロール表面付近の加熱部の温度分布はロール軸方向で一様であり、円周方向と半径方向で変化するので、ロール断面を二次元平面と仮定した。図9(b)に示すようにロールと圧延材との接触長さを L 、圧延材とロールとの温度差を θ_0 とする。ロールと圧延材の断面を長さ Δx のメッシュで分割し、二次元の熱伝導差分方程式を用いて次の無次元化条件で温度分布を数値計算で求めた。

初期条件：圧延材とロールとの温度差 ($\theta_0=1$)

圧延材とロールとの接触面の温度=0.5

境界条件：圧延材とロールの接触面以外の端面では断熱

図10に接触面の中央におけるロール表面付近の温度分布を示す。図中の点線部分を右上に拡大図示した。縦軸は無次元化温度を示し、温度上昇はこの数値に θ_0 をかければよい。横軸はロール表面からの距離を示し、 Δx の倍数で表示した。各曲線に示した数値は

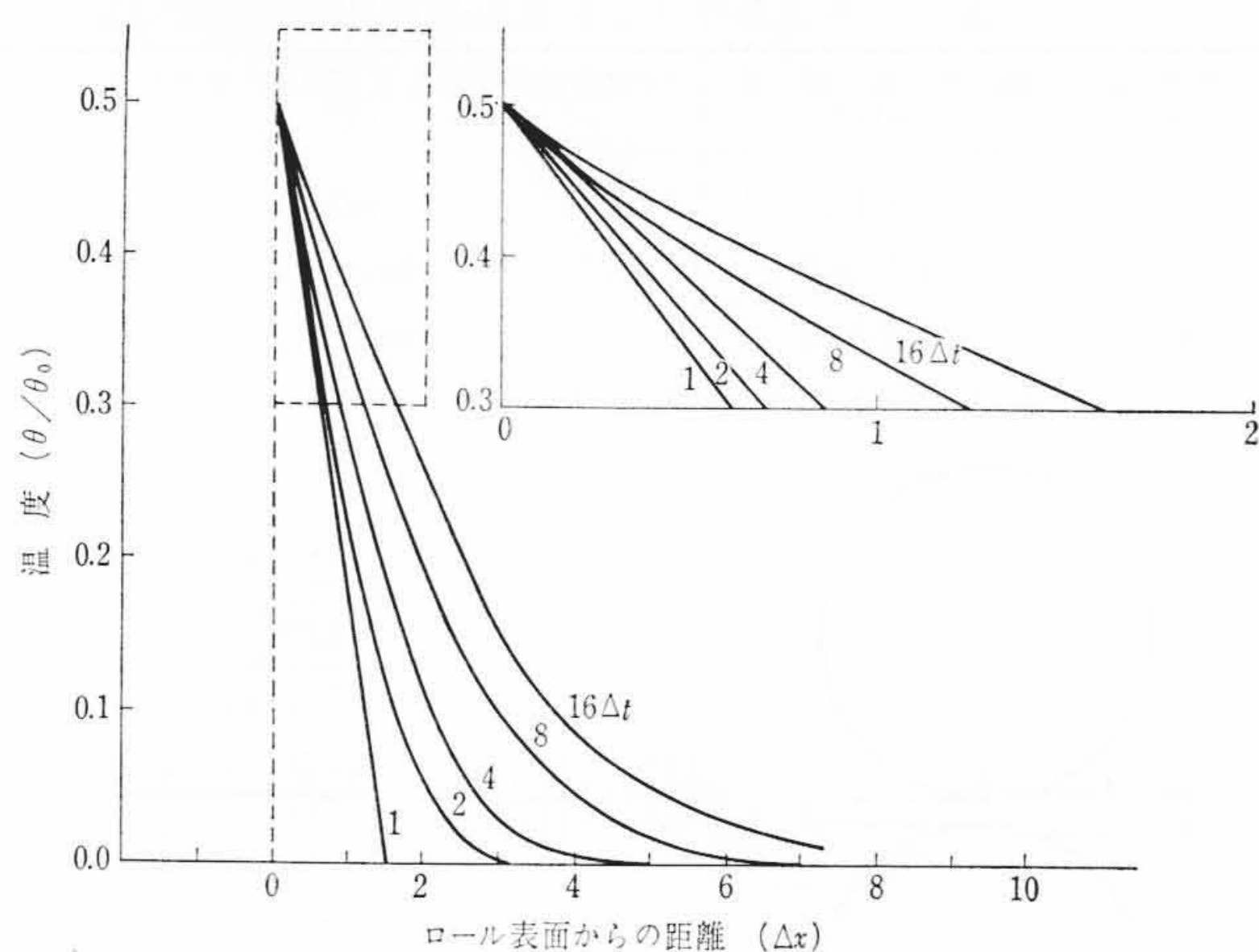


図 10 ロール表面付近の温度分布

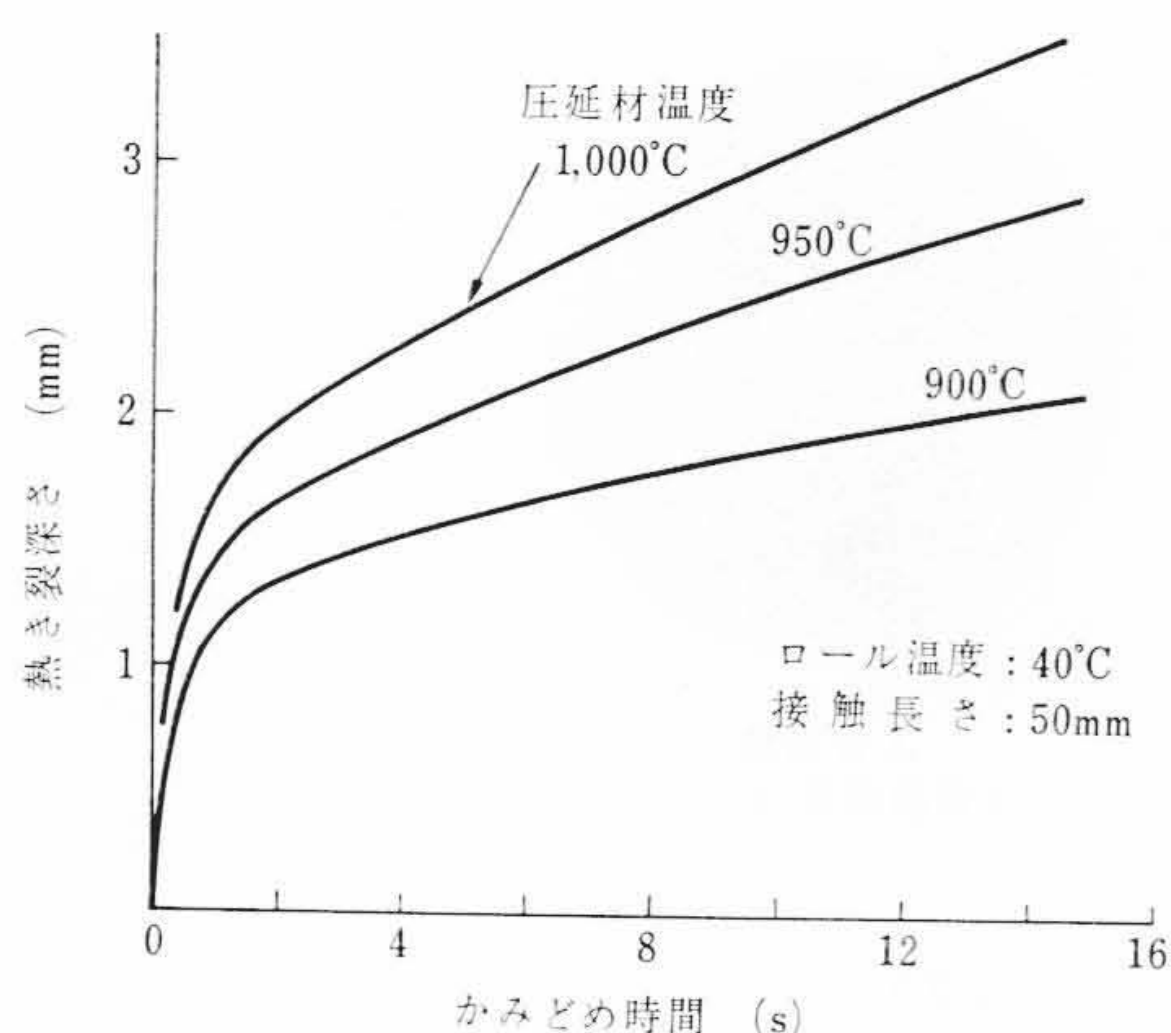


図 11 熱き裂深さと圧延条件の関係

時間のパラメータで、 Δt と Δx の間には次式の関係が成り立つ。

$$\frac{\kappa \Delta t}{c\rho(\Delta x)^2} = \frac{1}{3} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Δt : 時 間
 Δx : 長 さ
 κ : 熱 伝 導 率
 c : 比 熱
 ρ : 密 度

図 10 の結果は $L=10\Delta x$ にしているの、接触長さを与えれば Δx と Δt は定まる。表 2 は熱間厚板四重圧延機を対象に Δx と Δt を求め、ロール表面の温度この配を求めたものである。ロールの熱伝導率を $18 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 、比熱を $0.13 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 、密度を $7,700 \text{ kg/m}^3$ にとった。図 10 と表 2 の結果から次のことがいえる。かみどめ時間が長くなるにつれて圧延材の熱はロール表面から内部に流入するが、熱の内部への浸透深さは時間の平方根に比例し、圧延材温度が高いほどロール表面部の高温加熱層は深くなる。かみどめ時のロール表面の温度こう配は 5 秒後で $40\sim 50^\circ\text{C/mm}$ 程度になると推定される。

次に、2. で述べたかみどめ熱き裂の深さについて 3.3 のき裂発生条件を図 10 に適用して検討してみる。接触長さを熱き裂幅 50 mm と考えると $\Delta x=5 \text{ mm}$ 、(1)式から $\Delta t=1.7 \text{ s}$ となる。ロール温度を 40°C と考えると、圧延材温度は 960°C であるから $\theta_0=960-40=920^\circ\text{C}$ となる。き裂発生条件を満たす温度上昇はロール温度を考慮

表 2 かみどめ時の温度こう配

接 触 長 さ $L(\text{mm})$	Δx (mm)	Δt (s)	表面付近の温度こう配 ($^\circ\text{C/mm}$)			
			1.2 秒後	2.4 秒後	5 秒 後	10 秒 後
30	3	0.6	90	70	50	33
60	6	2.4	—	56	42	32
90	9	5.4	—	—	37	31
120	12	9.6	—	—	—	30

して $400-40=360^\circ\text{C}$ である。図 10 において熱き裂深さに関する高温層深さは $\theta/\theta_0=360/920=0.39$ に対応する Δx である。かみどめ時間を 3.4 秒と考えると熱き裂深さは 1.9 mm となり、図 3 に示したように実際に近い値になる。

5. かみどめ熱き裂の適正改削量

改削量について次の二つの考え方があろう。第 1 は熱き裂を完全に除去して再使用する、第 2 は熱き裂を圧延製品に影響がなく、かつそれ以上進展しない程度残して再使用する。ロール原単位低減の目的からすれば、前者よりも後者の考え方がすぐれている。き裂を若干残す場合、真のき裂深さを推定することができれば好都合である。二重圧延機の場合は曲げ応力が組み合わされて、残留き裂はそのあとの圧延によって進展しロール折損の原因となることがある⁽²⁾。しかし、四重圧延機の場合はロール胴部に発生する曲げ応力は小さいので、熱き裂を完全に除去しなくてもそのロールはのちの圧延に耐えうるものと考えられる。

前章までの結果を総括すれば次のことがいえる。

- (1) かみどめ熱き裂の幅（円周方向長さ）はロールと圧延材の接触長さに比例し、き裂はモザイク状模様を呈する。かみどめ時の熱的影響層は軸方向き裂がなくなるまで改削すれば除去され、き裂深さは見かけほど深くはない。
 - (2) かみどめ時の圧延材温度が高いほど、またかみどめ時間が長いほど深い熱き裂が発生する。図 11 は熱間厚板四重圧延機用ワークロールについて、かみどめ熱き裂深さと圧延条件との関係を図 10 の結果から求めた例である。き裂をどの程度残すかは再使用の実績から決めることが肝要である。
 - (3) かみどめ圧延に遭遇したとき、急冷を軽減できる措置がとりうるならば熱き裂の損傷をかなり軽くすることが可能である。
- 上述の考え方は一般の熱間圧延におけるかみどめ熱き裂に対しても適用できると考えられる。その場合、具体的な数値は使用ロールの材質と圧延条件によって変動する。

6. 結 言

熱間厚板四重圧延機で発生したかみどめ熱き裂を調査し、改削量と熱き裂パターンの変化との関係を明らかにした。次に、実験室的に実際に類似した条件で熱き裂試験を行ない、き裂の発生条件を求めた。すなわち、この試験によって実際と同じ熱き裂パターンがえられること、熱き裂の発生条件は材料の耐熱衝撃特性から定まり、き裂深さは高温加熱層深さによって影響されることを定量的に示した。さらに、かみどめ現象を解析し、かみどめ熱き裂の改削基準の考え方について付言した。

参 考 文 献

- (1) 関本：日立評論 別-42, 43 (昭 36-5)
- (2) 河原，関本：日立評論 45, 843 (昭 38-5)