

# 双ロール法におけるロールクラック防止の技術

行本 正雄\*・山根 浩志\*

Prevention Techniques of Roll Surface Crack in Twin Roll Caster

Masao YUKUMOTO and Hiroshi YAMANE

**Synopsis :** Thin strip casting of 4.5wt% silicon steel has been carried out with a twin roll caster with cooling rolls 550 mm in diameter and 500 mm in width. The casting speed was of the order of 2.1-5 m/sec and the thickness of the strip varied from 0.2 to 0.5 mm. One of the significant technologies for the casting of tonnage strip is the design of the long-lived cooling rolls. Micro-cracks occurred around the roll surface when casting heats of more than one ton. In these experiments, the roll temperatures of the inner and outer surfaces were measured during casting and thermal cycle of roll temperature was calculated from the measured values. Roll deformation behavior and working stress were analyzed by the two dimensional finite element method. Based on these theoretical calculations, this paper reports on (1) surface coating by Ni-Cr plating on the rolls, (2) design for an increased cooling water circulation rate in the rolls, and (3) application of a Cu alloy sleeve having excellent high-temperature strength. By adopting these improvements, the authors succeeded in producing a thin strip on a 3 ton/heat scale by twin roll casting.

**Key words :** strip casting ; silicon steel ; micro crack ; roll temperature ; roll deformation ; Ni-Cr plating ; Cu alloy.

## 1. 緒言

昨今、工程省略による低コスト化、短納期化あるいは難圧延材の薄板製造といったメリットから双ロール法キャストを中心に、各企業において実証機規模での開発が盛んに行われるようになり<sup>1-4)</sup>、技術的障害は多いものの実用化は間近と思われる。トンオーダー鑄造技術においては長時間の安定鑄造および薄帯の寸法精度や表面品質確保のため、冷却ロールの長寿命化、特に鑄造中に発生するロールクラックの防止が重要な課題である。鑄造中の冷却ロールの熱履歴に関しては溝口ら<sup>5)</sup>、平野ら<sup>6)</sup>がSUS304の鑄造データを、小菊ら<sup>7)</sup>、奈良ら<sup>8)</sup>は4.5%珪素鋼の鑄造データを用いて、熱伝達係数を算定し、一次元伝熱計算により考察している。

一方、田中ら<sup>9)</sup>は伝熱凝固モデルを提案し、各固相率での板厚とドラム押付力の関係を求め、さらに鑄片内部の応力場を有限要素法で解析し、不均一熱伝達が表面割れの原因となる事を明らかにしている。

しかしながら、これらはいずれも一次元の伝熱計算であり、冷却ロールの熱変形や応力場に関する報告は見あたらない。さらに、従来から連続鑄造用モールドでは表面処理技術等の改善が報告されているが<sup>9,10)</sup>、双ロール鑄造は連続鑄造に較べて、鑄造速度が10~100倍と大きく、圧延負荷もかかるため、詳細な冷却ロールの設計が必要となる。

そこで、本研究では双ロール鑄造における冷却ロールの熱サイクルを計算し、その後二次元有限要素法によりロール変形挙動および発生応力を評価するとともに、ロールクラック防止技術として、ロール材質の見直しとNi/Cr2層メッキの最適化に関して報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置概要

Fig. 1 に実験に用いた双ロール装置の模式図を示す。溶湯はスライディングノズルを用いて、注湯炉から一定流量制御によりタンディッシュ内に、さらに多孔ノズルを介して、双ロール間に注入される。鑄造ロールは外径550mm、幅500mm、肉厚(スリーブ厚み)25mmで、材質はCu合金であり、スリーブ内側に冷却水を流している。

ロール表面温度は接触式表面温度計をロール反キス点に押し当てて測定し、内部温度はロール内面3mm深さに埋め込んだ0.5φシース熱電対をスリップリングを通してロール外に取り出して測定した。ロール内冷却水温度は同じくシース熱電対によって測定した<sup>9)</sup>。

Table 1 に実験装置の主な仕様と実験条件の概略を示す。実験溶湯は難加工材である4.5%珪素鋼を用いた。ロール周速は2.1~5 m/sの範囲で得られた薄帯の厚みは200~500μm

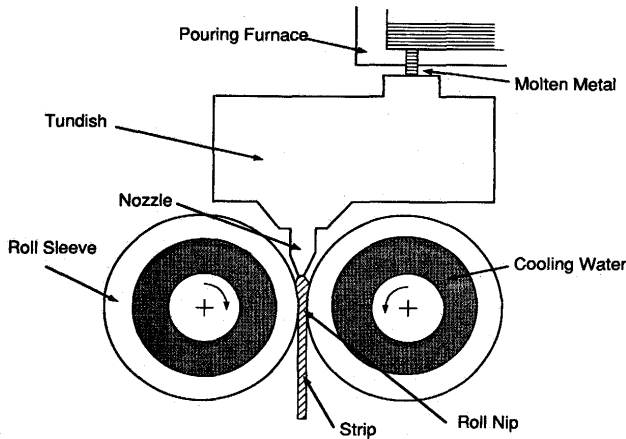


Fig. 1. Schematic drawing of twin roll caster.

Table 1. Specification of twin roll caster.

Heat size:	3000kg
Casting rate:	2-10 kg/s
Casting speed:	2.1-5 m/s (126-300 m/min)
Roll diameter:	550-800 mm
Roll width:	500 mm
Strip thickness:	0.2-0.5 mm
Strip width:	250-500 mm
Coil weight:	500 kg
Cast materials:	High silicon steel(4.5mass%Si-Fe)

である。鑄造初期には10~30kNの一定の圧下力が双ロール間に負荷され、溶湯の注入後、凝固シェルが冷却ロール表面から成長し、ロールキス点において薄帯を生成する。この時、ロールギャップは薄帯厚みを一定にすべく制御される。薄帯はロールキス部より搬送、巻取り部に誘導され、コイルとなる<sup>13)</sup>。

### 2・2 数値計算方法

冷却ロールの熱履歴、特にロールキス部での最高温度を求め、鑄造中の双ロールの伝熱計算はFig. 2に示す一次元の差分法で行った。計算は双ロール間に注湯された溶湯がロールに接触した位置から冷却を開始して、双ロールのキス点で凝固が完了するモデルを用いた。ロールの冷却は外表面が空冷で内面は水冷とした。双ロール間に注湯した溶湯温度は1873K、双ロール間のパドル深さは60mm、スリーブ厚は25mmとした。また、ロールと溶湯との熱伝達係数 $hm$ およびロールと冷却水との熱伝達係数 $hw$ は凝固シェルの生成過程にかかわらず一定とした。計算は熱伝達がほぼ定常状態になる時間(60周目)までロール回転に合わせて繰り返し行った。

一方、冷却ロールのスリーブ内の応力計算はFig. 3に示す二次元メッシュを用いた。解析は二次元有限要素法<sup>11)</sup>を用い、軸対称モデルを解析した。温度場は一次元伝熱計算結果および実測値を用いて、熱流速を与え、二次元での直接差分法により求めた。その後、この温度場から熱応力を、境界条件から発生応力を求めた。なお、計算に用いた物性値をTable 2に示す。境界熱伝達係数は以前に著者ら<sup>12,13)</sup>が報告

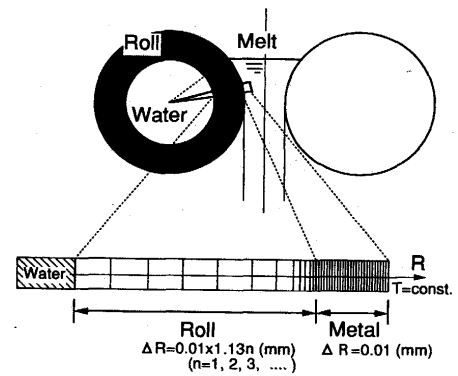


Fig. 2. Model of twin roll for one-dimensional heat transfer calculation.

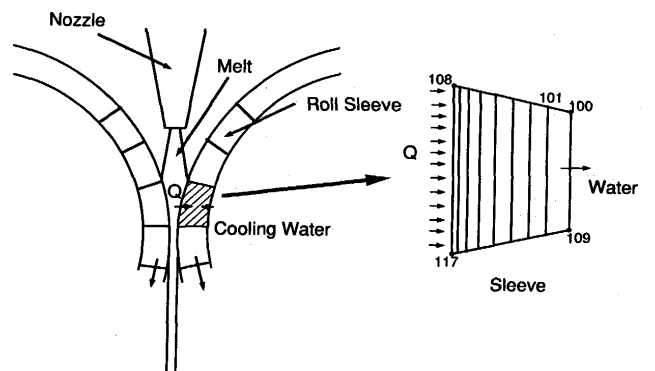


Fig. 3. Mesh modeling of two-dimensional calculations.

Table 2. Physical properties used in calculations.

Liquidus temperature :	1823K
Solidus temperature :	1723K
Latent heat :	252 kJ/kg
Thermal conductivity	
alloy (steel) :	29W/(m·K)
roll (copper) :	290W/(m·K)
Heat transfer coefficient	
alloy and roll :	45.5kW/(m <sup>2</sup> ·K)
roll and water :	16.8kW/(m <sup>2</sup> ·K)
Density	
alloy (steel) :	7.8x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
roll (copper) :	8.9x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
Thermal expansion coefficient :	16.4x10 <sup>-6</sup> /K
Young modulus :	13.5GN/m <sup>2</sup>
Roll-sleeve thickness :	25mm
Casting speed :	5m/s
Roll diameter :	550mm

した、ロールと溶湯間を $hm=46kW/m^2\cdot K$ 、ロールと冷却水間を $hw=16.7kW/m^2\cdot K$ とした。分割数は円周方向に48分割、半径方向に9分割とした。特に、半径方向は表面が薄くなるように、等比数列分割とした。

## 3. 結果および考察

### 3・1 冷却ロールの表面クラック発生状況

Fig. 4に冷却ロールのカラーチェック後の外観写真を示す。鑄造量が1Mg(トン)を越えると双ロールの冷却ロール表面に微細なクラックが発生する。Fig. 5に実験後に採取したスリーブ断面の光学顕微鏡写真を示す。クラックは主として

スリーブ幅方向の割れであり、深さは大きいもので0.5mm程度である。割れはいずれも粒界で発生しており、表面から内部に亀裂が進行している。

3・2 冷却ロールの温度測定および計算結果

Fig. 6 に冷却ロールが1サイクルする間のロール表面温度変化の一次元伝熱計算結果を示す。図中のプロットは反キス点におけるロール外表面温度の測定値である。この温度はロール周速5m/sにおいて約600Kであるが、これらの測定値と計算結果を重ね合わせるとロールキス点では750K近い温度になっていると推定される。

Fig. 7 にはロール周速2.1m/s時に測定したロール外表面と内部の温度変化を示す。注湯開始時には外表面、内面とも15Kであるが、注湯開始とともに温度が上昇する。注湯開始後50sでロール外表面、内部とも定常状態になり、双ロール反キス点における外表面で480K、内部では375~390Kとなっている。また内面から3mmと5mmの位置では約10K

の温度差があり、内面に近いほど温度は低い。また、スリーブ内部で測定される1サイクル中での温度変化は極めて小さく、1~2K程度であり、外表面で推定される150K近い温度変化の影響は殆どなくなっている。

Fig. 8 にロール周速2.1m/sでのロールスリーブ内温度分布の計算結果を示す。図中のプロットはFig. 5で求めた実測

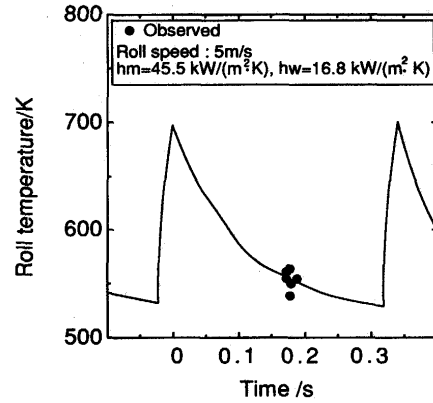


Fig. 6. Surface temperature change of cooling roll in one cycle.

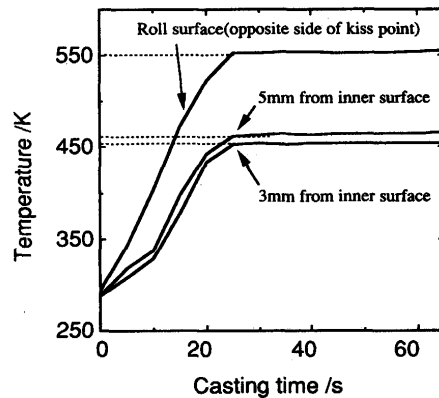


Fig. 7. Change of roll temperature during casting.

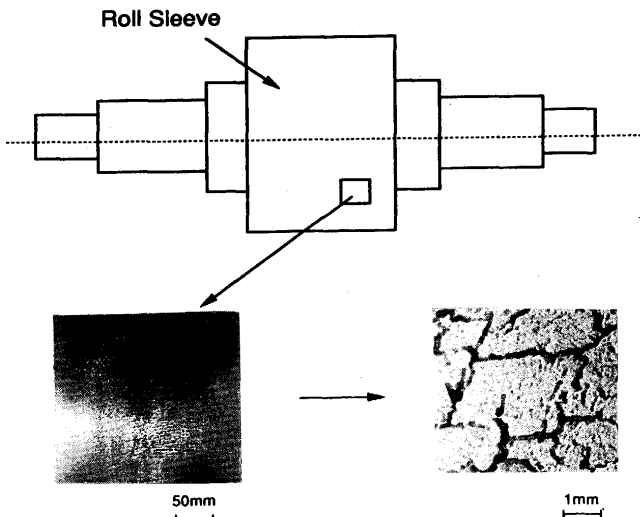


Fig. 4. Appearance of micro-crack on the surface of the surface of cooling rolls.

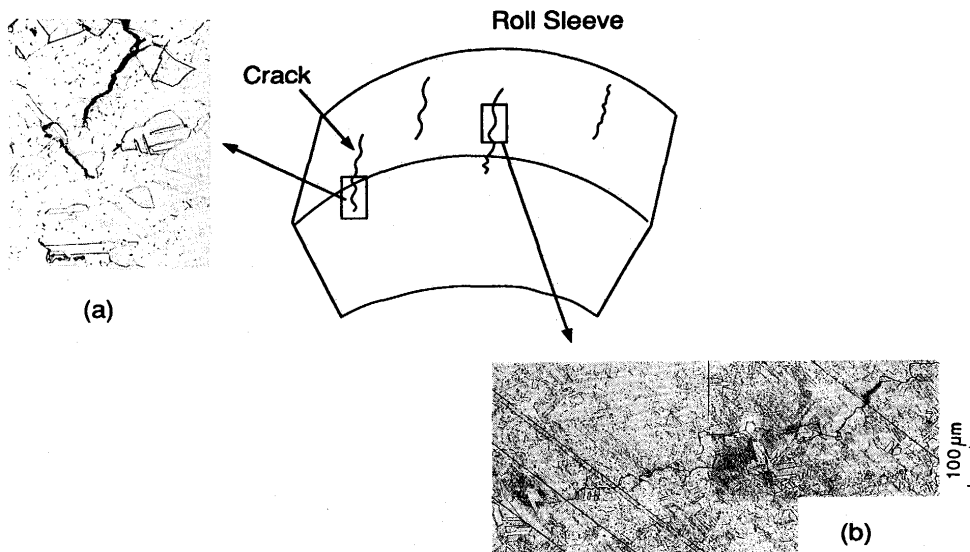


Fig. 5. Microstructure of copper alloy in the roll sleeve.

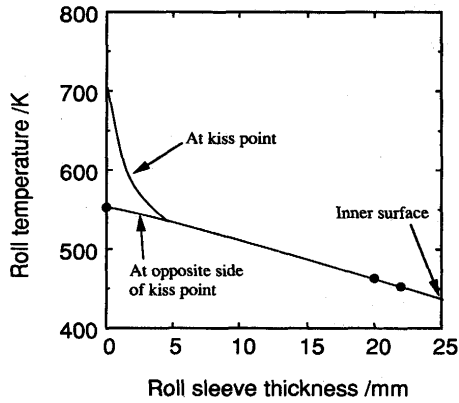


Fig. 8. Temperature distribution along radial direction of cooling roll.

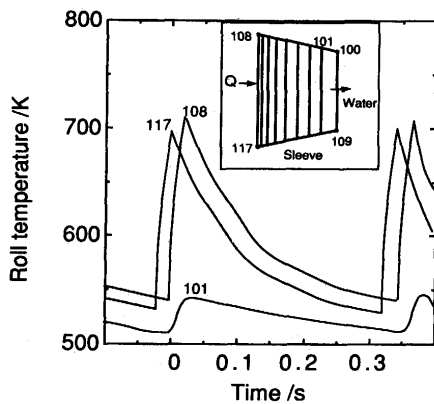


Fig. 9. Calculation result of temperature changes on mesh point.

温度である。表面、内部とも計算値とよく一致する。計算結果からロールスリーブ内面側はロールキス点でも反キス点でも温度に大きな変化はなく、外表面から4mmの位置までが温度変化の大きい領域になっている。

### 3・3 ロールクラック発生メカニズムの推定

#### 3・3・1 二次元非定常伝熱計算結果

Fig. 3 に示した半無限円筒軸対称モデルを用い、ロールの回転はメッシュ要素の境界条件移動により各節点の温度変化を計算した。伝熱計算は凝固を含まず、凝固潜熱を含めた熱流束を仮定し、内部水冷、空冷の境界条件はTable 2 の値を用いた。

ロール周速 5 m/sにおける最表面の節点温度の温度変化をFig. 9 に示す。各節点での温度変化はFig. 6 に示した計算および実測値と良く対応している。この計算により求めたスリーブ内温度分布を用いて発生する熱応力を計算した。

#### 3・3・2 二次元応力計算結果

Fig.10に応力計算の結果を示す。円周方向応力を全周にわたってプロットした。計算した応力は焼きばめ応力、圧延応力、熱応力およびこれらの合成作用応力(フープ応力)である。圧延力は9800N/500mm(=19.6N/mm)の節点荷重を与えた。計算結果から冷却ロール最表面でのフープ応力として、キス部で-390MPaとなり、これが解放されて再びキ

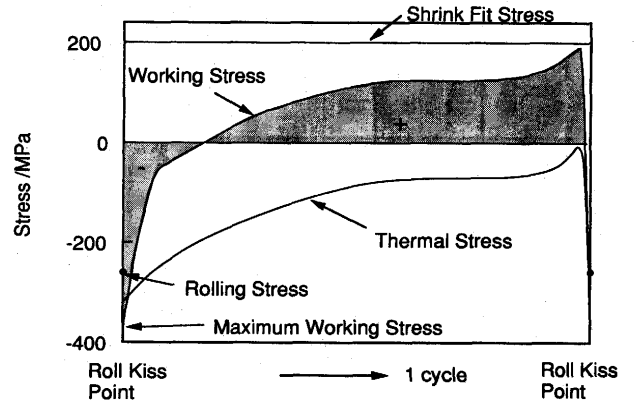


Fig. 10. Schematic diagram of working stress on the roll surface.

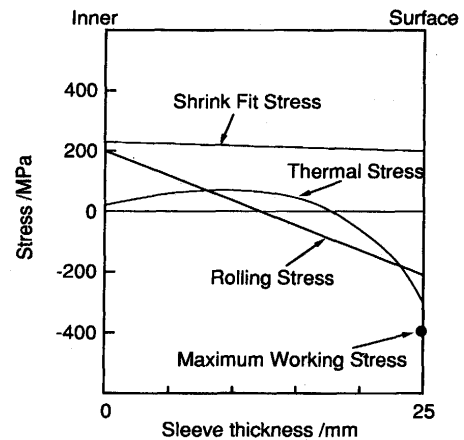


Fig. 11. Schematic diagram of stress distribution inside roll sleeve.

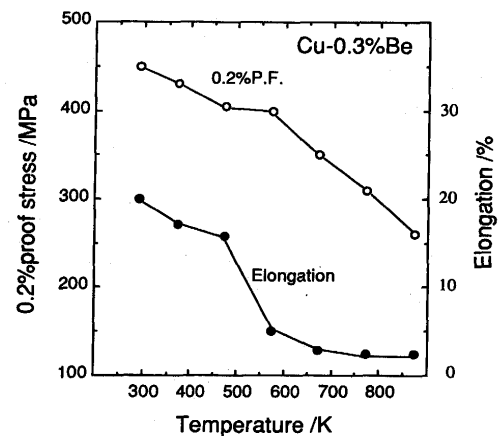


Fig. 12. Temperature dependence of 0.2% proof stress and elongation.

ス部に達する手前で+210MPaとなっており、典型的な繰り返し応力が働いている事がわかる。

Fig.11にはキス部のロール厚み方向の応力分布計算結果を示す。ロール表面層では最大圧縮応力が働き、内部では引張り応力が生じている。

Fig.12には市販Cu-0.3%Be合金の0.2%耐力と伸びの高温特性を示す。<sup>14)</sup>上記計算結果から静的にはキス部最大応力

が銅合金スリーブの0.2%耐力を越えており、圧縮降伏現象が発生している。更に、Fig.10に示した繰り返しフープ応力により圧縮疲労が進行し、パウジンガー効果<sup>15)</sup>により引張り側の降伏強度が低下し、鋳造量が1 Mgを越えるとFig. 4に示したヘアークラックがロール表面に発生したものと推定される。

3.4 ロールクラック対策とその効果

3.4.1 Ni/Cr2層メッキ

冷却ロールのスリーブ表面温度を下げるため、Ni/Cr2層メッキを施工した。冷却ロール表面にNiメッキを0.2mm厚、

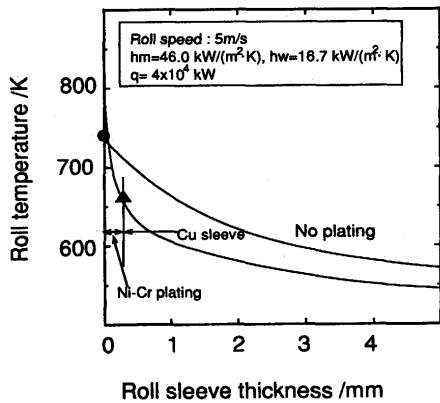


Fig. 13. Calculation result of roll temperature at kiss point.

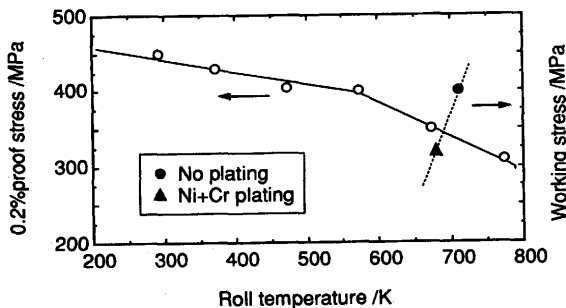
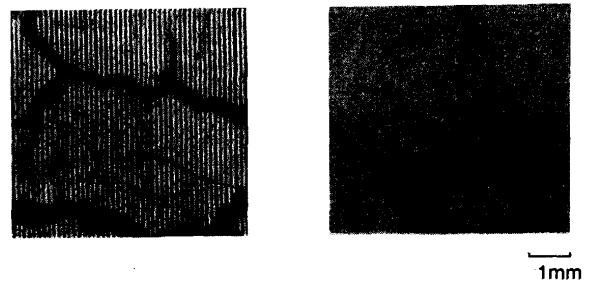


Fig. 14. Estimation on working stress.

その上にCrメッキを0.03mm厚で被覆した際のロールスリーブ内温度分布の計算結果をFig.13に示す。メッキなしでは冷却ロール60周目におけるロールキス部の温度は約750K近く、この温度域ではFig.12に示すように従来の銅合金の強度、伸びとも極端に低下する。一方、メッキを被覆した場合、Fig. 13からメッキ層と母材界面の温度が700K以下に抑制でき、Fig.14に示すように母材界面の最大発生応力が母材の0.2%耐力以下になる。この時、Crメッキ、Niメッキの高温強度が母材銅合金より高いため、クラックの発生を防ぐ事ができる。Fig.15に実験後の冷却ロールの表面外観を示す。写真(a)は鋳造量1 Mgでのメッキなしの場合で深く大きなクラックが観察された。一方、写真(b)は鋳造量3 MgでのNi/Cr2層メッキしたロール表面で全くクラックの発生は観察され



(a) Cu-0.3%Be (u=1.5m/s)

(b) Ni-Cr plating

u : Flow rate of water

Fig. 15. Appearance of roll surface after experiment.

Table 3. Comparison of mechanical properties on Cu alloy.

Cu alloy	Vickers hardness /MPa 9.8		Tensile strength /MPa		0.2%proof stress /MPa		Elongation /%	
	RT	673K	RT	673K	RT	673K	RT	673K
Cu-0.3%Be	200	160	600	430	450	360	20	4.5
Cu-Cr-Zr alloy	220	170	660	480	530	440	15	7.5

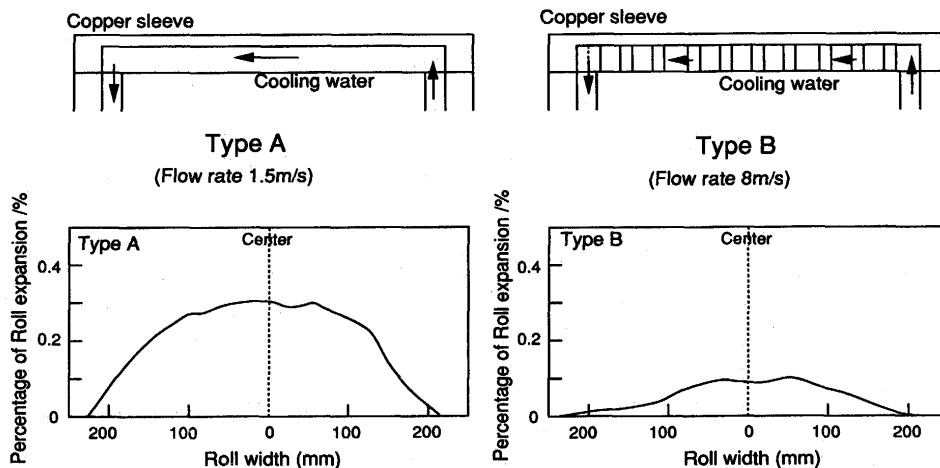


Fig. 16. Radial expansion of the roll during casting.

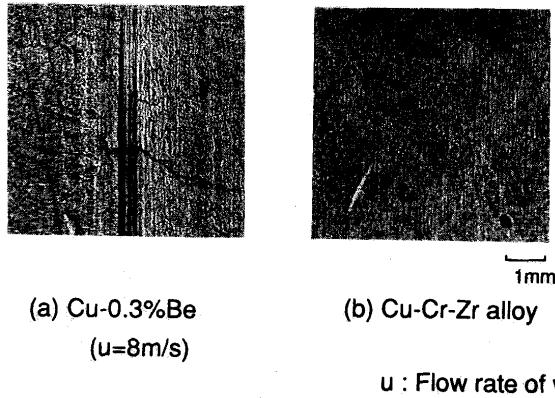


Fig. 17. Appearance of roll surface after casting 3ton.

なかった。

#### 3.4.2 Cu-Cr-Zr合金スリーブ

冷却ロールの表面温度は冷却水の線速度を増加する事により大幅に低下する事が知られており、例えば小沢ら<sup>16)</sup>は冷却水流速を1.5m/sから8m/sに増加させる事により、熱伝達を約2.5倍向上させ、温度を約80K低下させると報告している。

そこで、Table 3に示す市販の高強度高熱伝導性新合金スリーブ<sup>17)</sup>を用い、かつ冷却ロールの構造をFig.16のように変更して冷却水線速度を増加させ、表面での最大発生応力を下げ、また母材の高温強度を向上する事により、ロールクラックを防止した。Fig.17は casting 3 Mgにおける実験後の冷却ロール表面の観察結果である。

写真(a)は従来材ロールでの冷却水線速度8m/sの場合で、Fig.15の写真(a)に較べて、クラックの発生は軽度である。一方、写真(b)ではクラックの発生が全くなく、表面の凹凸も小さかった。

## 4. 結論

casting中に発生する冷却ロール表面の微細なクラックの発生機構解明のため、ロール表面および内部温度を測定し、二次元伝熱応力計算を行った。さらに、クラック防止のため、ロール表面へのメッキ被覆やスリーブ材質の見直し、ロール内部水冷の強化を試み、以下の結論を得た。

(1) casting量が1Mgを越えるとロール表面に微細なクラックが発生し、主として幅方向の割れであり、深さは大きいもので0.5mm程度で、いずれも粒界で発生している。

(2) ロール内部および表面温度測定と一次元伝熱計算からロールキス部では750K近い温度になっており、二次元応力計算からキス部最表面では $-390\text{MN/m}^2$ と銅合金スリーブの降伏点を越える最大発生応力の発生が予想される。

(3) ロールクラックの発生機構はキス部において圧縮降伏現象が発生し、その後キス部から解放され、熱応力の解放により、粒界で引張応力が発生する典型的な繰り返熱疲労によるものと推定される。

(4) スリーブへのNi/Cr2層メッキ被覆により、メッキ層と母材界面の温度が700K以下に抑制でき、界面での最大発生応力を母材の0.2%耐力以下に抑制でき、クラックの発生は全くなかった。

(5) 更に、冷却水流速を増加させ、母材の強度、熱伝導を向上する事により、Ni/Cr2層メッキ同様、 casting量3Mgにおいても実験後の冷却ロール表面にはクラックの発生が全くなく、表面の凹凸も小さかった。

## 文 献

- 1) S.Tanaka, H.Takeuchi, H.Nakashima, K.Sasaki and K.Yamamoto: Proc. of 3rd International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, (1994), 327.
- 2) 月ヶ洞 稔, 坂口治男, 佐々木万晶, 毛利勝一, 角谷 茂, 山田桂三, 西前 年: 日立造船技報, 54 (1993) 2, 8.
- 3) 峠 竹弥, 天野景博, 佐々木均, 中谷孝司, 長島信一, 轟 秀和, 丸山哲男, 松井正之, 萩原 浩, 戸塚 覚: 日本冶金技報, 3 (1994), 1.
- 4) 森川 広, 石丸淳一, 山内 隆, 長谷川守弘: 日新製鋼技報, 67 (1993), 34.
- 5) 溝口利明, 宮沢憲一: 鉄と鋼, 81 (1995), 58.
- 6) 平野 聡, 安田 健, 児玉英世, 木村智明, 福井克則, 松永 滋: 鉄と鋼, 79 (1993), 41.
- 7) F.Kogiku, M.Yukumoto, K.Shibuya, M.Ozawa and T.Kan: Materials Research Society Symposium Proceedings, 58 (1996), 15.
- 8) 奈良正功, 三宅 苞, 行本正雄, 小沢三千晴: 鉄と鋼, 73 (1987), S1473.
- 9) 多田吉男, 笠井 聡, 市原 晃, 大西 廣: 川崎製鉄技報, 19 (1987) 1, 52.
- 10) 池田圭吾, 大西 廣, 後藤信孝, 敷土文夫, 蓮沼純一, 日和佐章一: 材料とプロセス, 3 (1992), 192.
- 11) 有限要素法の基本と応用, プレイン図書出版
- 12) M.Yukumoto, K.Sibuya, T.Kan and Y.Ito: Rapidly Quenched Metals, ed. by S.Steeb and H.Warlimont, (1985), 91.
- 13) M.Yukumoto and H.Yamane: ISIJ Int., 35 (1995), 778.
- 14) 中越合金カタログ, 10-13.
- 15) 機械工学便覧(基礎, 応用編), 日本機械学会発行, 丸善出版, (1987)
- 16) M.Ozawa, F.Kogiku, M.Yukumoto, S.Miyake and T.Kan: Model Control Cast Weld Process, 4 (1988), 255.
- 17) 特開昭64-62430