
急冷薄帯キャスターの開発

Development of Thin Strip Caster

小沢 三千晴(Michiharu Ozawa) 山根 浩志(Hiroshi Yamane) 三宅 苞(Sigeru Miyake) 行本 正雄(Masao Yukumoto) 菅 孝宏(Takahiro Kan)

要旨：

川崎製鉄では双ロール法による急冷薄帯キャスターの開発を進めてきた。開発したキャスターは、(1)溶湯を薄帯化する凝固系、(2)薄帯の搬送・巻取りを制御する搬送系および(3)コイルを連続して巻き取る巻取り系で構成される。得られる薄帯は主として 0.4mm×500mm の形状で、各種制御によって 500kg コイルの連続巻取りを実施している。開発する上で最も重要な凝固時の熱伝達を実測と計算を交えて解析し、薄帯とロール間、ロールと冷却水間の熱伝達係数および凝固時の冷却速度を求めた。この結果を基に casting 中の熱膨張が少ない高冷却能を有するロールを設計し、幅方向板厚偏差の少ない薄帯 casting が可能となった。

Synopsis：

Kawasaki Steel has developed a thin strip caster of the twin roll type. The caster encompasses the following three consecutive processing steps: solidification, transportation, and coiling. The caster solidifies molten metal into a thin of about 0.4 mm×500 mm. Melt flow control and strip-tension control contribute greatly to stable production of near-net-shape coil of over 500 kg. The paper discusses mainly heat transfer phenomena during solidification. The heat transfer coefficients on both surfaces of a water-cooled roll were obtained by numerical calculation and temperature measurement of the roll. The heat transfer coefficient between the roll and cooling water was related to the flow rate of the water using a planar flow model. Furthermore, it was shown that a roll of higher cooling capacity caused less thermal expansion during casting, reducing the thickness deviation of the cast strip.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Development of Thin Strip Caster



小沢 三千晴

Michiharu Ozawa
技術研究本部 鉄鋼研
究所 主任研究員(課
長)



山根 浩志

Hiroshi Yamane
技術研究本部 鉄鋼研
究所



三宅 哲

Shigeru Miyake
技術研究本部 鉄鋼研
究所 主任研究員(課
長)



行本 正雄

Masao Yukumoto
技術研究本部 鉄鋼研
究所 主任研究員(課長
補)



菅 孝宏

Takahiro Kan
技術研究本部 鉄鋼研
究所 主任研究員(部長
補)

1 緒 言

溶融金属から急速凝固によって直接薄帯を得る、いわゆる急冷薄帯製造法はアイデアとしては100年以上の歴史を持つが¹⁾、鉄鋼分野ではまだ実用化するには至っていない。しかし近年、各企業において実証規模での開発が盛んに行われるようになり²⁻⁵⁾、技術的障害は多いもののいずれは実用化されるものと見られている。

溶融金属の急速凝固技術のメリットとしては、第1には工程省略による低製造コスト化や短納期化があるが、現時点あるいは近い将来におけるメリットは、従来プロセスでは薄帯化が困難な難加工性材料や急速凝固によって特性向上が期待される高付加価値材料の薄帯製造が可能となる点にある。

そのような材料の一例として、4%以上のSiを含有した高珪素鋼薄帯がある。高珪素鋼薄帯は磁気特性に優れるが、難加工性であるため従来プロセスでは製造が困難な材料である⁶⁾。しかし、急速凝固技術は高珪素鋼の薄帯化を可能とし、しかもその組織は特異な集合組織(100)[0 VW]を示し、磁気的には理想的な無方向性材料となる⁷⁾。このような高珪素鋼薄帯に代表される難加工性材料を

要旨

川崎製鉄では双ロール法による急冷薄帯キャスターの開発を進めてきた。開発したキャスターは、(1)溶湯を薄帯化する凝固系、(2)薄帯の搬送・巻取りを制御する搬送系および(3)コイルを連続して巻き取る巻取り系で構成される。得られる薄帯は主として0.4 mm×500 mmの形状で、各種制御によって500 kgコイルの連続巻取りを実施している。

開発する上で最も重要な凝固時の熱伝達を実測と計算を交えて解析し、薄帯とロール間、ロールと冷却水間の熱伝達係数および凝固時の冷却速度を求めた。

この結果を基に鋳造中の熱膨張が少ない高冷却能を有するロールを設計し、幅方向板厚偏差の少ない薄帯鋳造が可能となった。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed a thin strip caster of the twin roll type. The caster encompasses the following three consecutive processing steps: solidification, transportation, and coiling. The caster solidifies molten metal into a thin strip of about 0.4 mm×500 mm. Melt flow control and strip-tension control contribute greatly to stable production of near-net-shape coil of over 500 kg.

The paper discusses mainly heat transfer phenomena during solidification. The heat transfer coefficients on both surfaces of a water-cooled roll were obtained by numerical calculation and temperature measurement of the roll. The heat transfer coefficient between the roll and the cooling water was related to the flow rate of the water using a planar flow model. Furthermore, it was shown that a roll of higher cooling capacity caused less thermal expansion during casting, reducing the thickness deviation of the cast strip.

商品化するために、川崎製鉄では急冷薄帯製造技術の1つである双ロール法による急冷薄帯キャスターの開発を進めてきた。現在、高珪素鋼のみならず高Crステンレス鋼やNi基超合金の製造方法を本キャスターにおいて確立し、製造した薄帯の一部はPhoto 1に示すような溶接用材料として使用されている。

双ロール法に限らず、溶鋼の急冷薄帯製造技術はNear-net-shapeの製造を目的としているため、その形状、品質とも従来の連続製造とは比較にならない程の高い精度が要求される。したがって、急冷薄帯製造技術を実用に供するためには多くの技術開発が必要であるが、とくに凝固、搬送および巻取り技術においていかに形状、品質を確保、向上させるかが重要なポイントである。

本論文では、今回開発した注湯系から巻取り系までを有する双ロール式急冷薄帯キャスターの概要を述べるとともに、双ロール法において最も重要な急速凝固時の熱伝達についての解析結果を報告する。

* 平成元年3月31日原稿受付



Photo 1 Strip coil (0.4 mm × 450 mm) of high Cr stainless steel for over-lay welding

2 急冷薄帯キャスターの概要

開発した急冷薄帯キャスターの概要を Fig. 1 に示す。本キャスターは垂直型双ロール方式で、機能上3つの系に大別される。

- (1) 炉、ノズル、双ロールから成る注湯・凝固系
- (2) 二次冷却帯、ピンチロールから成る搬送系
- (3) 薄帯を連続して巻き取る巻取り系

注湯・凝固系は、急冷薄帯の形状や品質を決定づける、いわば中枢部で、ノズルやロールの形状、材質は最も重要な開発項目である。注湯は双ロール間に溶湯を注入する方式で、薄帯厚みに直接影響する注湯速度は炉のスライディングゲートノズルで制御している。この注湯速度制御によって、薄帯製造方向の厚み偏差は±7%以下に抑えられ、安定した製造を行うことができる⁹⁾。

使用しているロールは主として外径 550 mm の内部水冷方式で銅合金スリーブを用いている。幅は 500 mm が最大である。目標とする薄帯厚みによっては端辺(サイドダム)の使用も可能になっている。

搬送系は、巻取りリールへの薄帯搬送だけでなく、張力、薄帯厚みさらには薄帯表面温度等各種制御に必要なデータのオンライン測定を実施しており、急冷薄帯の安定製造と薄帯品質向上のために欠くことのできない領域である。張力は巻取り制御に、薄帯厚みは注湯速度制御にフィードバックしている。

双ロール間で急速凝固した薄帯は双ロール出側ではまだ 1000°C 以上の高温であり、二次冷却を必要とする。二次冷却が無い場合、

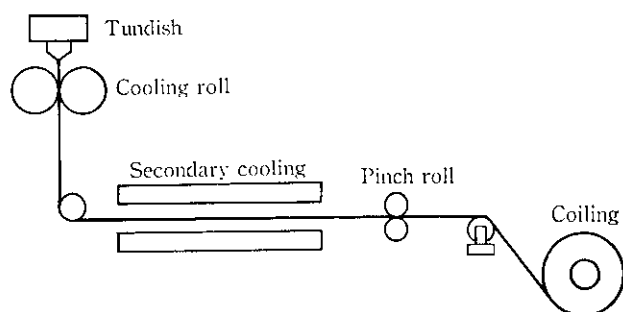


Fig. 1 Configuration of twin roll caster

材料によっては薄帯の結晶粒成長や表面酸化を生じ、急速凝固で得られる材料特性を損なうことがある。

巻取り系は、張力一定で巻き取る方式で、1 コイル 500 kg を連続して巻き取ることができる。

3 凝固系の熱伝達

3.1 実験方法

実験溶湯は難加工性材料である 4.5% Si 鋼を用いた。ロール周速は 2.1~5.0 m/s の範囲で、得られた急冷薄帯の厚みは 200~500 μm である。

ロールの熱伝達を解析するため製造中にロールの表面および内部の温度を測定した。ロール表面は測定容易なロールキス点より 180° 回転した位置(反キス点)で测温した。ロール内部の测温はロール内面から 3 mm, 5 mm の位置にシース熱電対を埋め込み、ロール回転中の温度変化をスリッピングを介してレコーダーに取り出した。

その他、双ロール間のパドル(湯溜まり)高さ、薄帯厚み、ロール表面の径方向の変位をオンラインで測定した。また、薄帯の凝固組織は断面をナイトール腐食して観察した。

3.2 双ロールの伝熱計算

製造中双ロールの伝熱計算は一次元の差分法で行った⁹⁾。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。

溶鋼が双ロール間に注湯された時の温度は 1600°C、双ロール間のパドル深さは 60 mm、ロールスリーブ厚は 20 mm および 25 mm とした。これらの数値は実験時に最も多く使用された条件である。またロールと溶湯との熱伝達係数 h_m (cal/cm² · s · °C) およびロールと冷却水の熱伝達係数 h_w (cal/cm² · s · °C) は各々の計算では凝固シエ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までロールの回転に合わせて繰り返行われた。本解析では、ほぼ定常に達したと見られる、注湯開始後 100 サイクル時の計算結果を使用した。

3.3 実験結果

3.3.1 凝固組織

Photo 2 に高注素鋼急冷薄帯の凝固組織を示す。薄帯の表面からは柱状晶が発達し、最終凝固位置と見られる薄帯厚みの中央部は粒状晶組織が生成している。柱状晶は一次デンドライトアームが明瞭に認められ、その間隔は表面直下で 2~4 μm と細かく、内部ほど粗くなって、表面から 100 μm の位置では 3~7 μm となる。また、粒状晶の大きさは 5~20 μm 程度でデンドライトは不明瞭である。薄帯の凝固組織は大半がこのような柱状晶と粒状晶から成る組織であるが、粒状晶は存在せず両表面から発達した柱状晶が中央部まで到達する例もある。

ロール幅方向中央部の熱膨張が端部より大きいロールで薄帯を製造した場合、Fig. 2 に示すように粒状晶領域は中央部で小さく、端部で大きくなる傾向が見られる。このようなロールを使用した場合、端部での薄帯ブレイクアウトを生じやすいことから、薄帯がロールキス部を通過後も薄帯端部では未凝固の残溶湯があるものと思われる。そのような残溶湯部分は、薄帯が冷却ロールから離脱することによって冷却速度が低下するため、方向性のあるデンドライト



Photo 2 Solidification structure of 4.5%Si-steel strip

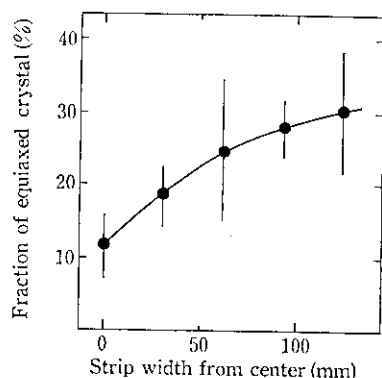


Fig. 2 Fraction variation of equiaxed zone along transverse direction of strip (4.5%Si steel)

組織にならずに粒状晶組織になっているものと推定される。

3.3.2 薄帯厚み

薄帯厚みはバドル高さとロール周速に大きく影響される。Fig. 3 に薄帯厚みにおよぼすロール周速の影響を示す。Fig. 3 はバドル高さ 60~65 mm のデータであるが、周速が増すにつれて板厚は薄くなる。周速 2.1 m/s では約 450 μm の板厚であるが、周速 5 m/s で 250~300 μm の板厚となっている。

これらのデータから得られる凝固定数 k ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$) は 8.6~10.4 の範囲にあり、双ベルト式キャスターで得られた薄スラブの $k=20^{(10)}$ や双ロール法で鍛造したより厚い 1~10 mm 薄帯の $k=12\sim16^{(11)}$ に比較して小さい。これは凝固速度が遅いということではなく、数 10 mm 厚の薄スラブ凝固の場合に適用できる $1/2$ 乗則が mm 厚以下の薄帯凝固にはあてはまらないことを意味する。

3.3.3 ロールの温度

Fig. 4 にロールが 1 サイクルする間のロール表面温度変化の計算結果を示す。図中●印はロール反キス部外表面の実測値である。ロール反キス部外表面の温度は 5 m/s 時で 220~280°C であるが、この実測データと計算結果を重ね合わせるとロールキス部では 400°C

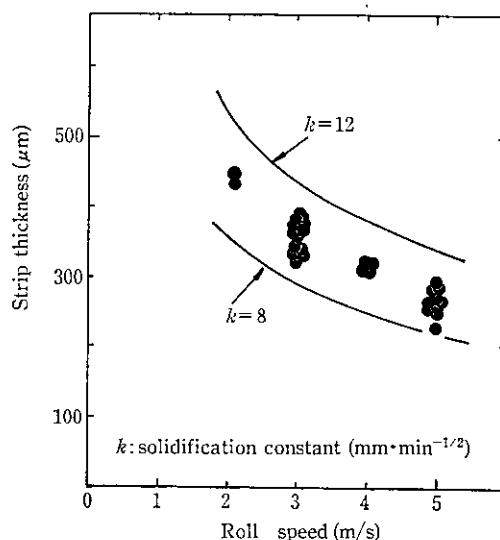


Fig. 3 Influence of casting speed on strip thickness

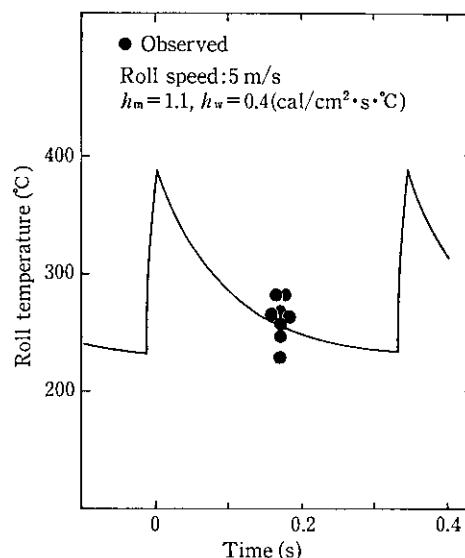


Fig. 4 Surface temperature change of cooling roll in one cycle

近い温度になっていると推定される。

Fig. 5 にはロール周速 2.1 m/s 時に実測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、内部とも 15°C であるが、注湯開始とともに温度が上昇する。注湯開始後 50 秒でロール外表面、内部とも定常状態になり、双ロール反キス部の外表面で 205°C、内部では 100~115°C となっている。また内面から 3 mm と 5 mm の位置では約 10°C の温度差があり、内面に近いほど温度は低い。なお、Fig. 5 で示した結果はロールスリップ厚が 25 mm のデータであるが、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い。温度変化は 1~2°C 程度であり、外表面で推定される 150°C 近い温度変化の影響はほとんどなくなっている。

周速 2.1 m/s、ロールスリップ厚 25 mm の時の伝熱計算結果を Fig. 6 に示す (3.4 で求めた熱伝達係数を用いた)。図中●印は実測値で表面、内部とも計算値と一致する。計算結果からロールスリップ内面側はロールのキス部でも反キス部でも温度に大きな変化はなく、外表面から 4 mm の位置までが温度変化の大きい領域になっていることがわかる。

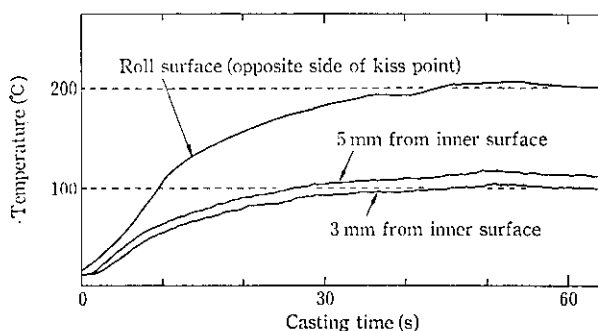


Fig. 5 Change of roll temperature during casting

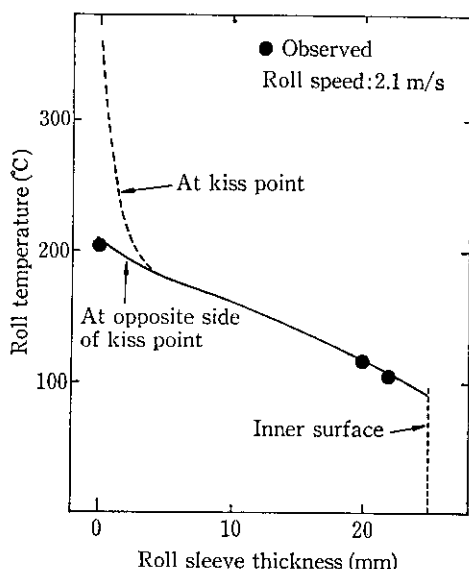


Fig. 6 Temperature distribution along radial direction of cooling roll

3.4 双ロールの伝熱解析

3.4.1 熱伝達係数の推定

ロールスリーブ厚および双ロール間のパドル高さが一定であれば、得られる薄帯厚みとロール外表面の温度を伝熱計算結果と比較することによって、熱伝達係数 h_m (薄帯-ロール間), h_w (ロール-冷却水間) を求めることができる。Fig. 7 はロールスリーブ厚 17~23 mm, 双ロール間パドル高さ 55~65 mm の実験条件における薄帯厚みとロール表面温度のデータから熱伝達係数 h_m , h_w を見積もった図である。例えば、薄帯厚みが 280 μm で反キス部のロール表面温度が 270°C であれば $h_m=1.15$ で $h_w=0.3$ と求めることができる。Fig. 7 中の矢印 ($\Rightarrow$) で示すように、本実験では $h_m=1.0\sim 1.2$, $h_w=0.3\sim 0.5$ と見積もることができる。

同様に周速 2.1~4.0 m/s における h_m を求めた。その結果、ロール周速が減少して薄帯が厚くなると h_m が小さくなる傾向が見られた。例えばロール周速が 5 m/s で薄帯厚みが 280 μm 程度の場合、 h_m は 1.1 であるが、周速が 2.1 m/s で 450 μm の場合、 h_m は約 0.8 である。

溶融金属を急冷凝固させる時の金属と冷却体との間の熱伝達係数に関しては、さまざまな急冷方法に対して検討されている。熱伝達係数に影響を及ぼす因子としてロール周速¹²⁾、冷却体の表面粗度¹³⁾、冷却体の曲率¹⁴⁾等が考えられるが、おおむね薄い薄帯の凝固時は大きく、厚くなると小さくなる傾向が見られる。単ロール法

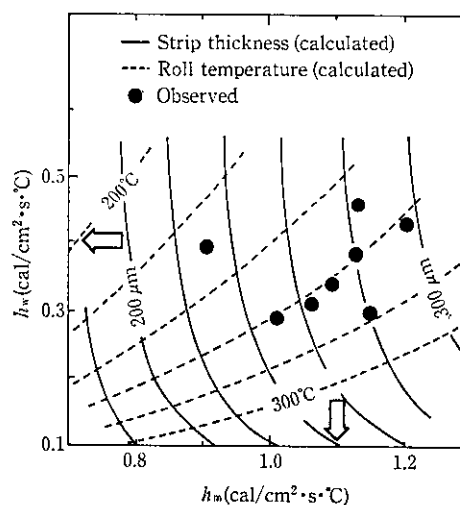
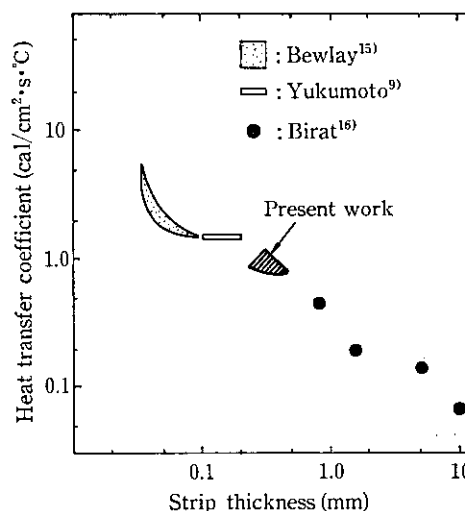
Fig. 7 Estimation of heat transfer coefficient, h_m (between metal and roll) and h_w (between roll and water), by strip thickness and roll temperature (at 5 m/s of roll speed)

Fig. 8 Relation between heat transfer coefficient and strip thickness

で作製したリボン厚みは 100 μm 以下が多く、熱伝達係数はデンドライトフォーム間隔から冷却速度を推定する方法や光温度計による測定から求めている例が多い。Bewlay ら¹⁵⁾ は 35~95 μm 厚の 316 L ステンレス鋼薄帯を単ロール法で作製した時の熱伝達係数 $h_m=1.5\sim 5.0$ を求めている。双ロール法で 100 μm 以上の薄帯厚みになると薄帯厚みと伝熱計算の比較から熱伝達係数を求める例が多く、Yukumoto ら⁹⁾ は 100~200 μm 厚の薄帯に対して $h_m=1.5$ を得ている。さらに厚い板の急速凝固では Birat ら¹⁶⁾ が双ロール法で作製した 5 mm 厚の板に対して $h_m=0.14$, 10 mm 厚の薄帯に対して $h_m=0.07$, メルトオーバーフロー法により作製した 1 mm 厚前後の薄帯の場合に $h_m=0.2\sim 0.5$ の熱伝達係数を求めている。以上の結果を整理して Fig. 8 に示す。

Tenwick ら¹⁷⁾ は Cu 合金リボンを単ロール法で作製し 70 μm 厚のリボンの場合、凝固中の熱伝達係数は 6.0 であるのに対し、完全凝固後では 0.5 と小さくなることを示した。この結果から固相状態での接触は熱伝達係数を著しく小さくすることがわかる。これは凝固収縮によって生じたエアーギャップのため伝熱抵抗が増加するこ

とが原因と思われる。すなわち、厚い薄帯ほど冷却体との接触表面が凝固してから薄帯の凝固完了までの時間が長く、その間冷却体との接触が固相状態で行われるため、見かけ上熱伝達係数を小さくしているものと見られる。以上の結果から本実験で得られた熱伝達係数 $h_m = 0.8 \sim 1.1 (\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ は薄帯厚みから判断して妥当な数値であり、周速が増して薄帯厚みが薄くなるほど h_m は大きくなると言えよう。

3.4.2 薄帯凝固時の冷却速度

4.5%Si 鋼の液相線温度は 1470°C 、固相線温度は 1430°C である。得られた熱伝達係数を用いて伝熱計算を行い、 1470°C で凝固を開始し、 1430°C で凝固を完了するまでの冷却速度を求めた。その結果、薄帯表層部では $1.6 \times 10^4 ^\circ\text{C}/\text{s}$ 、中心部で $7.3 \times 10^3 ^\circ\text{C}/\text{s}$ の冷却速度を得た。この値は単ロール法による $100 \mu\text{m}$ 以下の薄帯で得られる $10^3 \sim 10^6 ^\circ\text{C}/\text{s}$ ^{15,16)} に比較し1桁小さな値である。

高珪素鋼凝固時の冷却速度 $V(^{\circ}\text{C}/\text{s})$ と一次デンドライトアーム間隔 $d(\mu\text{m})$ の関係は冷却速度 $\sim 1^\circ\text{C}/\text{s}$ の範囲で岸武らが求め、(1)式で表している¹⁹⁾。

$$d = 270 V^{-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式が急速凝固領域でも適用可能かを見積もるため、3~20 mm 厚の水冷銅モールドに高珪素鋼溶湯を注入する実験を行った。注入時にはモールド内に熱電対を挿入しておき、注入後凝固中の温度変化を測定して冷却速度を求めた。さらに凝固後の試料から凝固組織を観察し、一次デンドライトアーム間隔を測定した。双ロール法のデータ、水冷銅モールド法のデータを(1)式と比較して Fig. 9 に示す。本データのような急速凝固の範囲でも、一次デンドライトアーム間隔と冷却速度の関係は(1)式とよく一致する。

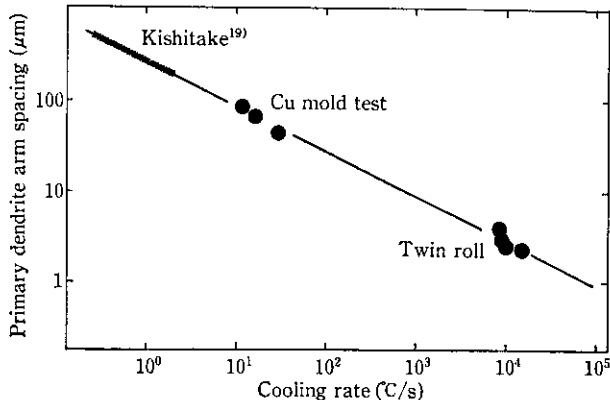


Fig. 9 Relation between primary dendrite arm spacing and cooling rate during solidification

3.4.3 ロールの冷却

Fig. 10 に示すように鋳造中のロールは熱負荷によってロール幅方向中央部が凸になるように変形する。Fig. 10 はロール反キス部の実測値(光学式距離センサー)で、ロール構造の異なる2つの例を示している。図中縦軸はロール径に対する膨張比(%)で示している。タイプAが主として本解析に使用したプロトタイプのロールで、熱膨張が大きい。そのため、薄帯幅方向の凝固が不均一で厚み偏差が大きくなり、薄帯端部でブレイクアウトを生じやすくなっている。このような熱膨張を抑止するため、冷却能を高めたロール構造としたのがタイプBである。これはタイプAでは平均 1 m/s の冷却水流速だったものをタイプBでは 7 m/s に増速して冷却を強化したものである。冷却強化によってタイプBの膨張量はタイプAの $1/4$ に減少し、薄帯端部のブレイクアウトを大幅に低減できた。そ

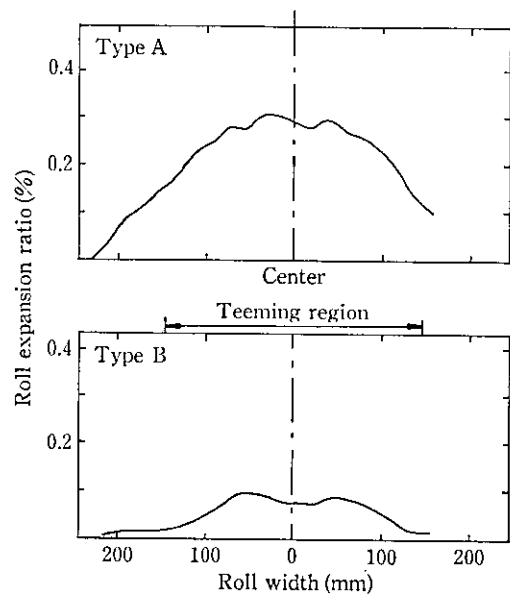


Fig. 10 Radial expansion of roll during casting

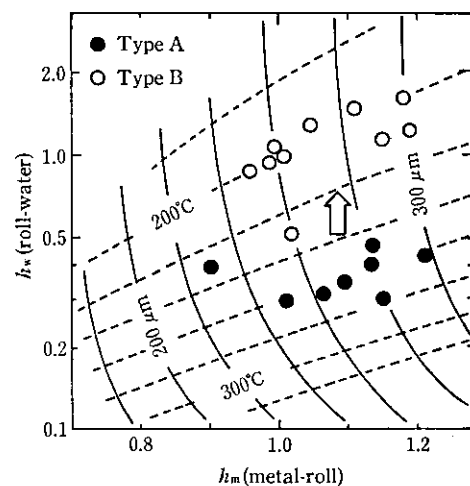


Fig. 11 Heat transfer coefficient for rolls with different flow rates of water

の結果、350~500 mm の広幅薄帯の安定鋳造を達成し、幅方向の薄帯厚み偏差を $\pm 7\%$ 以下にすることが可能となった。

この2種類のロールで鋳造した時の熱伝達係数を、薄帯厚みとロール表面温度から推定した結果を Fig. 11 に示す。図中の実測値は Fig. 7 と同様、ロール周速 5 m/s 、ロールスリップ厚 $17 \sim 23 \text{ mm}$ 、双ロール間バドル高さ $55 \sim 65 \text{ mm}$ の実験条件におけるデータである。タイプA、Bのロールとも h_m は 1.1 前後で同じであるが、ロールスリップ内面と冷却水間の熱伝達係数 h_w は明瞭な差が見られる。タイプAで $h_w = 0.3 \sim 0.5$ であるのに対し、タイプBでは $h_w = 0.7 \sim 1.5$ とより大きな熱伝達係数となっている。

この熱伝達係数の差はロールの内部冷却水の流速の差によるものであると推定される。ロールスリップ内面における冷却水との熱伝達を平板の乱流熱伝達モデルで表すことができると仮定すると、ロールスリップ内面と冷却水間の境界における熱伝達は(2)式で表される²⁰⁾。

$$\text{Nu} = 0.037 \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、Nu はヌセルト数、Re はレイノルズ数、Pr はプラント

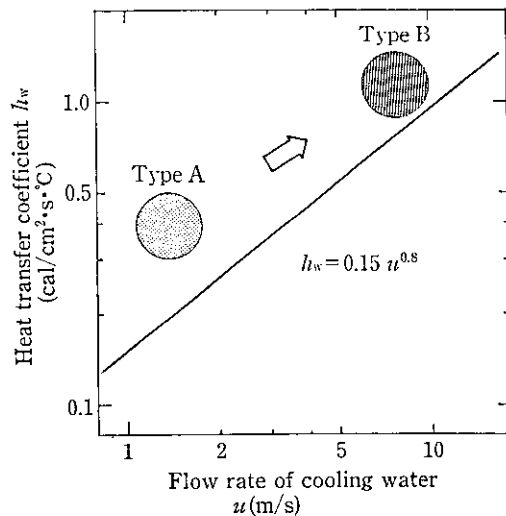


Fig. 12 Effect of flow rate on heat transfer coefficient between roll and water

ル数である。

境界における冷却水の温度を 60°C として (2) 式に物性値を代入して単純化すると、

$$h_w = 0.15 u^{0.8} \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。ここで、 u は冷却水流速 (m/s) である。

Fig. 12 に (3) 式の関係を示す。図中タイプ A、B ロールの冷却水流速と求めた熱伝達係数 h_w の関係を領域で示した。タイプ A、

B ロールの熱伝達係数 h_w の差は (3) 式で計算される差と同傾向にあり、冷却水流速が大きく影響していることがわかる。

4 結 言

川崎製鉄では双ロール法による急冷薄帯キャストの開発を進めてきた。双ロール製造方式において最も重要な役割を果たす伝熱過程を高珪素鋼薄帯製造を例に解析した。その結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) 高珪素鋼急冷薄帯の凝固組織は表面から柱状晶が発達し、内部の最終凝固位置近傍は粒状晶が生成している。柱状晶の一次デンドライトアーム間隔は $2\sim 7\mu\text{m}$ で内部ほど粗くなる。薄帯凝固時の冷却速度は $0.7\sim 1.6\times 10^4^{\circ}\text{C/s}$ であり、一次デンドライトアーム間隔で整理できる。
- (2) 薄帯とロール間の熱伝達係数 $h_m = 0.8\sim 1.1\text{ cal/cm}^2\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$ であり、ロール周速が大きく薄帯が薄くなるほど大きくなる。
- (3) ロールと内部冷却水間の熱伝達係数 h_w は冷却水流速に大きく影響される。本実験範囲では $h_w = 0.3\sim 1.5\text{ cal/cm}^2\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$ であった。冷却水流速を増すことによってロールの熱膨張を抑制することができる。

以上の結果から、双ロールに対する最適ロールが設計され、 $350\sim 500\text{ mm}$ の広幅薄帯の安定製造を達成し、幅方向の薄帯厚み偏差を $\pm 7\%$ 以下にすることが可能となった。さらに、注湯速度から巻取り張力制御に至るまで必要な技術、制御を開発し、高 Cr ステンレス鋼を中心とする急冷薄帯の品質向上と安定操業を達成した。

参 考 文 献

- 1) H. Bessemer: U. S. Patent No. 49, 053, July 25, (1865)
- 2) J. F. Grubb, D. B. Love, A. Murthy, and J. D. Nauman: "Casting Specialty Steel Strip", Proceedings of 5th International Iron and Steel Congress, Washington, D.C. April (1986), 841-847
- 3) C. C. Gerding and E. Aukrust: "The Effects of Machine Design on Pool Feeding, Strains Shrinkage in the Two-sided Strip Casting Process", Proceedings of an International Symposium on Casting of Near Net Shape Products, Honolulu, Hawaii, November (1988), 185-199
- 4) T. A. Gasper and L. E. Hackman: "Stainless Steel Strip and Fiber by Melt Overflow", Proceedings of an International Symposium on Casting of Near Net Shape Products, Honolulu, Hawaii, November (1988), 613-620
- 5) 吉田千里, 安中弘行, 野崎輝彦: 「急冷凝固した工具鋼の鋳片の特性」, 鉄と鋼, 74 (1988) 3, 457-464
- 6) 津屋 昇, 荒井賢一: 「新薄帯物質」, 固体物理, 13 (1978) 4, 237-242
- 7) 小菊史男, 小沢三千晴, 渋谷 清, 大戸 浩, 菅 孝宏: 「高珪素鋼急冷薄帯の凝固と特性」, 鉄と鋼, 71 (1985) 10, A229
- 8) S. Miyake, F. Kogiku, M. Yukumoto, M. Ozawa, T. Kan, and A. Momoo: "Melt Flow Control in Twin Roll Casting", Proceedings of an International Symposium on Casting of Near Net Shape Products, Honolulu, Hawaii, November (1988), 621-628
- 9) M. Yukumoto, K. Sibuya, T. Kan, and Y. Ito: "Analysis of the Solidification Process in the Roller Quenching Method", Rapidly Quenched Metals, eds. S. Steeb and H. Warlimont, (1985), 91-94, [Elsevier Science Publishers B.V.]
- 10) 杉谷泰夫, 中村正宜, 白井善久, 岡崎 卓, 吉原正裕: 「ツインベルトキャストによる薄スラブ連铸時の凝固冷却特性」, 鉄と鋼, 71 (1985) 10, A253
- 11) 西岡信一, 土田 裕, 北川 融, 藤田米章, 佐藤博明, 大塚政明: 「双ロール型薄鋳片製造法の検討」, 鉄と鋼, 71 (1985) 10, A241
- 12) A. G. Gillen and B. Cantor: "Photocalorimetric Cooling Rate Measurements on a Ni-5wt.%Al Alloy Rapidly Solidified by Melt Spinning", Acta Met., 33 (1985) 10, 1813-1825
- 13) S. C. Huang and H. C. Fiedler: "Effects of Wheel Surface Conditions on the Casting of Amorphous Metal Ribbons", Met. Trans. A, 12A (1981) 6, 1107-1112
- 14) 山内 隆, 長谷川守弘: 「SUS304 溶鋼の初期凝固速度の測定」, 鉄と鋼, 73 (1987) 5, S649
- 15) B. P. Bewlay and B. Cantor: "Photocalorimetric Cooling Rate Measurements on 316L Stainless Steel Rapidly Solidified by Melt Spinning", International Journal of Rapid Solidification, 2 (1986) 2, 107-123
- 16) J. P. Birat, P. Blin, J. L. Jacquot, P. V. Riboud, and B. Thomas: "Near Net Shape Continuous Casting of Flat Products at IRSID", Proceedings of an International Symposium on Casting of Near Net Shape Products, Honolulu, Hawaii, November (1988), 737-749
- 17) M. J. Tenwick and H. A. Davies: "The Mechanism of Ribbon Formation in Melt-Spun Copper and Copper-Zirconium", Rapidly Quenched Metals, eds. S. Steeb and H. Warlimont, (1985), 67-70, [Elsevier Science Publishers B. V.]
- 18) H. Muhlbach, G. Stephani, R. Sellger, and H. Fiedler: "Cooling Rate and Heat Transfer Coefficient during Planar Flow Casting of Microcrystalline Steel Ribbons", International Journal of Rapid Solidification, 3 (1987) 2, 83-94
- 19) 岸武勝彦, 岡本 平: 「鉄基二元合金のデンドライト・アーム・スベージング」, 鉄と鋼, 63 (1977) 3, 425-431
- 20) J. R. Welty: "Engineering Heat Transfer", (1974), 273-275, [New York, John Wiley & Sons, Inc.]