- (32) J.A.Tallmadge : *Powder Metallurgy Processing*, Ed.H.A.Kuhn and J.A.Lawley, Academic Press, (1978), 1.
- (33) N.Dombrowski and W.R.Johns : *Chem.Eng.Sci.*, **18**(1963), 203.
- (34) B.G.Lewis, I.W.Donald and H.A.Davies : *Solidification and Casting of Metals*, The Metals Society, (1979), 490.
- (35) W.E.Ranz and W.R.Marshall, Jr. : *Chem. Eng. Prog.*, **48**(1952), 141, 173.
- (36) I.Ohnaka, T.Fukusako, T.Ohmichi, T.Masumoto, A.Inoue and M.Hagiwara : *Proc. Fourth Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals*, Sendai, (1981), 31.
- (37) 公開特許公報 (A) : 昭 57-29505 (昭和 57 年 2 月 17 日 公開)

日本金属学会誌 第 46 卷 第 11 号 (1982) 1102-1108

双ロール法急速凝固プロセスの冷却特性*

宮沢 憲一** 長 隆郎** 井上 道雄***

J. Japan Inst. Metals, Vol. 46, No. 11 (1982), pp. 1102-1108

Cooling Characteristics of the Twin-Roll Rapid Solidification Process

Ken-ichi Miyazawa**, Takao Choh** and Michio Inouye***

The microscopic solidification structure of Pb-Sb eutectic alloy ribbons prepared by the twin-roll rapid solidification process has been examined to understand cooling characteristics of the process. The result shows that the average size and the area ratio of globular structure mainly consisting of Sb have the minimum for a certain roll rotation speed and decrease with decreasing initial roll gap. The effect of melt flow rate on the structure has not been detected under the adopted experimental conditions.

Regarding the relationship between the solidification structure and the cooling rate of melt, a preliminary experiment of the rapid quenching from melt has revealed that with increasing cooling rate the structure consisting of Sb phase becomes globular and the average size decreases.

Furthermore, velocity and temperature fields of the process were estimated using a mathematical model to discuss effects of key process parameters on cooling rates of the rapidly solidified metallic ribbons. The estimated results show that under the adopted experimental conditions the mean cooling rate in the melt region between rolls has a maximum for a certain roll rotation speed and increases with decreasing initial roll gap. These theoretical predictions qualitatively agree with results obtained from the observed solidification structure.

(Received June 4, 1982)

I. 緒 言

双ロール法は薄帯状急冷金属試料の製造にとって有用なプロセスの 1 つであり、昨今急冷金属材料に対する関心が増大していることから、本プロセスの特性に関する基礎資料を得ることは急務と考えられる。著者らは前報⁽¹⁾で、低融点金属を用いた双ロール法の実験とロール間隙における凝固金属の圧延変形流動の理論解析を行ない、本プロセスの圧延特性について検討し、急冷試料の形状を決定する要因を明らかにした。

本プロセスにより急冷試料を製造する際、均一な形状の

試料が得られるようにプロセスを改良および制御することに加えて、試料の組織構造を支配するプロセスの冷却特性を明らかにしておくことも基本的に重要となる。しかしながら、双ロール法ではロール間隙において複雑な熱や運動量の移動現象が生じているため、急冷金属の組織構造と凝固条件やプロセス変数との関係が把握されていないのが現状である。

本研究では、急冷試料の冷却速度や凝固組織に及ぼす操作変数の効果を明らかにするため、双ロール法で得られた急冷試料の凝固組織の調査と、ロール間隙における融体と凝固金属内の速度場、温度場および冷却速度の理論的推算

** 名古屋大学工学部金属学科 (Department of Metallurgical Engineering, Nagoya University, Nagoya)

*** 名古屋大学工学部金属学科、現在：名誉教授 (Department of Metallurgical Engineering, Nagoya University, Nagoya. Now Professor Emeritus of Nagoya University)

* 1981 年 11 月日本金属学会京都大会に発表

を行ない、これらの結果に基づいて本プロセスの冷却特性を検討する。

II. 方 法

1. 凝固組織調査

試料金属として Pb-Sb 共晶合金を用いて双ロール法の実験を行ない、得られた薄帯状急冷試料の凝固組織を顕微鏡観察した。本急冷法における主要な操作変数はロール回転速度、設定ロール間距離および融体流量であり、実験ではこれら3つの値を系統的に変化させた。他の実験条件は前報⁽¹⁾と同じである。組織観察面は試料長手方向に直角な断面で、エッチングには硝酸(1.4 kmol/m³, 8 cm³)、水酢酸(16 cm³)およびグリセリン(76 cm³)からなる腐食液⁽²⁾を用いた。

上述の実験から凝固組織に及ぼす操作変数の効果を確かめることができるが、この結果に基づいてプロセスの冷却特性を検討するためには、凝固組織と冷却速度の関係を前もって知る必要がある。Pb-Sb 合金の凝固組織に及ぼす冷却速度の効果に関して、Kotler ら⁽³⁾は亜共晶組成に対する1次および2次デンドライトアーム間隔の実測結果を報告し、Bode と Löhberg⁽⁴⁾は過共晶組成の場合 Sb を多く含む組織が冷却速度の増加に伴って粒状化することを観察している。しかしながら、共晶組成および比較的高冷却速度の場合の報告が見当たらないため、本研究では、冷却速度と凝固組織の関係を把握するための急冷実験を別途行なった。この実験では、1 端を封じた石英又は黒鉛の小径パイプに試料金属を入れて溶解し、一定温度(553 K)に保持後、パイプと試料を冷却媒体中に落下し急冷した。この際、試料内に設置されたクロメル-アルメル熱電対(直径 0.1 mm)の起電力変化を波形記憶装置を使って記録し、冷却速度を実測した。

2. 数学的モデルによる冷却速度の推算

本プロセスにおける試料内温度分布や冷却速度に関して、現状では実測が困難なため理論的な推算が必要とな

る。従来、試料内温度変化などを推算するために、試料の厚み方向の1次元熱伝導のみを考慮した比較的簡便な熱移動モデルが採用されているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、これらのモデルではロール間隙における融体と凝固金属の流動効果を考慮できない。

一方、著者ら⁽⁷⁾は本プロセスの熱移動に関して、試料の圧延流動を考慮した数学的モデルを既に提出した。本研究では、実験で得られた試料の冷却速度に及ぼす操作変数の効果を検討するため、既提出のモデル⁽⁷⁾に基づいて、ロール間隙における試料内の速度場、温度場および冷却速度の推算を行なった。なお、この計算では、前報⁽¹⁾で提示した凝固金属の圧延の理論解析に基づき、試料厚さとロール圧下力の計算値が実測結果に一致するように圧延時のロール間距離と凝固完了位置を推算するが、ロール表面に融体が接触開始する位置は試行錯誤法により求める必要がある。計算に採用した熱的数値は、比熱 $c=0.15 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、融体と固体の熱伝導度 $k_l=16.7$, $k_s=29.3 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ 、凝固潜熱 $\lambda=38.5 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、ロール表面における熱伝達係数 $h=41.8 \text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、注湯温度 $T_0=553 \text{ K}$ 、凝固温度 $T_s=525 \text{ K}$ 、ロール表面温度 $T_r=293 \text{ K}$ である。また、試料密度 $\rho=10.5\times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、および凝固金属の変形に関する応力指数 $m=6$ を用いた。

III. 結果および考察

1. 凝固組織と冷却速度の関係

本研究で採用した試料金属の凝固組織と冷却速度の関係を把握するため、急冷実験を別途行なった。その結果を Photo.1 に示す。これらの組織写真は、熱流方向に平行な試料断面における中心と表面のほぼ中間に位置するものであるが、試料の直径が 1.5~2.5 mm と小さいため、断面内の位置による組織の差異は殆んど認められなかった。また、Photo.1 に示した冷却速度は、実測した冷却曲線上で試料の温度が初期値から平衡凝固温度(525 K)まで低下する期間における平均値である。Photo.1 において、白く見える部分が Sb の多い相から構成されている組織である

Photo.1 Change in solidification structure of Pb-Sb eutectic alloy with average cooling rate of melt ($\bar{R}_{c,1}$).

(Cooling rate $\bar{R}_{c,1}$ a: 3.1, b: 8.9, c: 290, d: 2100 K/s, cooling media a, b: air, c: water, d: mercury, mold a~c: quartz tube, d: graphite tube, diameter of solidified metal a: 2.5, b: 1.5, c: 2.5, d: 2.0 mm)

が、冷却速度の増大に伴ってこの白色組織が微細な粒状に変化し、その粒径が平均的に小さくなることがわかる。このことは、Pb-Sb 合金の過共晶組成の場合に、Sb を多く含む組織が冷却速度の増加に伴って微細粒状化するという Bode ら⁽⁴⁾の観察結果と一致する。

Pb-Sb 2 元系合金の平衡状態図⁽⁸⁾に従えば、共晶組成の融体をきわめて遅い速度で冷却した場合、常温での組織は Pb の多い α 固溶体と Sb の多い β 固溶体の 2 相から構成される。本合金組成は 88.9 mass%Pb, 11.1 mass%Sb であり、平衡凝固時の β 相の体積比が約 17 vol% と小さく、組織上、マトリックスの α 相に第 2 相の β 相が不連続に分散した異常 (anomalous) 共晶として観察される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。冷却速度が大きくなると、液体の過冷が増大するために第 2 相 (β 相) の核発生頻度は大きくなるが、凝固時の溶質拡散が不十分となるために β 相の成長が抑制されて、組織写真上で白色の β 相が微細粒状化するものと考えられる。また、冷却速度が増大すれば、凝固後の各々の固溶体中での他相の析出が困難になるため、凝固時の組織が常温まで維持されやすいことの他に、凝固時に析出した各固溶体中における各溶質の固溶度が増大していることが考えられる。

B-Gautier ら⁽⁹⁾は Pb-Sb 合金の急冷実験を行ない、X 線回折により急冷試料の組織構造を調査しているが、彼らの結果によれば、冷却速度の増大に伴って、Pb を多く含む α 固溶体には Sb が、また Sb を多く含む β 固溶体には Pb がそれぞれ過度に固溶されている。したがって、上述の Photo.1 および B-Gautier らの結果から、Pb-Sb 共晶合金の凝固組織と冷却速度の定性的関係として、冷却速度の増大に伴い、Sb を多く含む β 固溶体からなる組織は微細粒状化するとともに、Sb を過度に固溶した過飽和 α 固溶体として凝固する可能性が大きくなると考えられる。

2. 凝固組織に及ぼす操作変数の効果

双ロール法の実験で得られた急冷試料の凝固組織を Photo.2 に示す。この一連の実験ではロール回転速度を種々変化させたが、回転速度の増加に伴って試料の厚さと幅はともに減少する。Photo.2 の各組織写真と Photo.1(d) を比較すると、Photo.2 では Sb を多く含む白色粒状組織の粒径が平均的に小さくなり、Photo.1(d) で観察される大きさ (約 $1\sim 3\mu\text{m}$) の白色粒状組織の個数および白色組織の面積割合がともに減少していることから、双ロール法における急冷試料の冷却速度は Photo.1(d) の場合 ($2.1\times 10^3\text{ K/s}$) よりも大きいと考えられる。また、Photo.2 において、大きさが約 $1\mu\text{m}$ 以上の白色粒状組織の個数と面積割合はロール回転速度の増加とともに減少し、回転速度が 37.5 s^{-1} (2250 rpm) の場合に最小となっている。したがって、凝固組織と冷却速度の定性的関係より、本実験条件下ではロール回転速度が 37.5 s^{-1} 付近で冷却速度が最大になると推察される。

本急速凝固プロセスではロール間隙で凝固した金属が即座に圧延変形されるため、Photo.2 の凝固組織は Photo.1 の静的凝固の場合と異なり、圧延の効果が加味されていると思われる。ロール回転速度の増大に伴って、凝固完了位置はロール間隙の下流側へ移動し、凝固金属の圧下率 $((H_2 - H_1)/H_2)$ が減少する。ここで、 H_2 と H_1 は各々凝固完了位置および出口位置での試料の半厚みである。前報⁽¹⁾の推算手法に基づけば、Photo.2 の実験条件の場合、ロール回転速度が 4.7 s^{-1} (280 rpm) から 45.0 s^{-1} (2700 rpm) に増大する間に、凝固金属の圧下率は 0.84 から 0.22 まで単調に減少する。したがって、Photo.2 の組織写真において凝固直後の圧延変形による顕著な組織変化は観察されない。

Photo.2 Effect of roll rotation speed (ω_0) on solidification structure of rapidly solidified metallic ribbon.

(ω_0 = (a) $4.7(280)$, (b) $12.5(750)$, (c) $20.8(1250)$, (d) $29.2(1750)$, (e) $37.5(2250)$, (f) 45.0 s^{-1} (2700 rpm), initial roll gap $2H_{00}=50\mu\text{m}$, melt flow rate $Q'=2.0\text{ g/s}$)

Photo.3 Effect of initial roll gap ($2H_0$) on solidification structure of rapidly solidified metallic ribbon.

($2H_0$)=(a) 0, (b) 30, (c) 50, (d) 70, (e) $100\mu\text{m}$, roll rotation speed $\omega_0=20.8\text{ s}^{-1}$ (1250 rpm), melt flow rate $Q'=2.7\text{ g/s}$

が、ロール回転速度が遅い場合ほど圧延による変形流動の効果が試料の組織に現われやすいことになる。

凝固組織に及ぼす設定ロール間距離の効果を **Photo.3** に示す。同写真において、設定ロール間距離の減少に伴い、大きさが約 $1\mu\text{m}$ 以上の白色粒状組織が少なくなり、全体としてより微細な組織になるように観察される。したがって、前述の凝固組織と冷却速度の定性的関係より、急冷試料の冷却速度は設定ロール間距離の減少に伴って大きくなると考えられる。なお、本プロセスにおいて設定ロール間距離のみを小さくすると、試料の厚さは減少し、幅は大きくなる。これに伴って凝固完了位置がロール間隙の上流側へ移動するため、凝固金属の圧下率が增加する。**Photo.3** の実験条件を使って圧下率を推算した結果、0, 30, 50, 70 および $100\mu\text{m}$ の設定ロール間距離に対して、圧下率は各々、0.93, 0.80, 0.62, 0.46 および 0.28 の値であった。したがって、設定ロール間距離が短い場合の凝固組織は圧延変形の影響を受けやすいと考えられる。

凝固組織に及ぼす融体流動の効果を検討するため、ロール回転速度が 20.8 s^{-1} (1250 rpm)、設定ロール間距離が 25 または $55\mu\text{m}$ で一定とし、融体流量を $1\sim 4\text{ g/s}$ の範囲で種々変化した実験を行なったが、これらの実験条件下では、融体流量の変動による凝固組織の差異が顕著には認められなかった。

3. 冷却速度に及ぼす操作変数の効果

本プロセスでは圧延による融体と凝固金属の変形流動およびロール壁への熱移動が同時に起こっているため、試料の温度変化を推算する際、ロール間隙における試料の速度分布と温度分布の計算の coupling が必要になる。本研究で採用した数学的モデル⁽⁷⁾では、陰解法の差分計算により温度分布と凝固プロファイルを求めるが、速度分布には解析解が使用されているため、この coupling 計算は比較的容易である。

共晶組成の Pb-Sb 合金を用いた双ロール法の実験に対する速度場の推算結果を **Fig.1** に示す。この計算では速度

Fig.1 Flow pattern between rolls estimated for roll rotation speed of 16.7 s^{-1} (1000 rpm). (Initial roll gap $2H_0=50\mu\text{m}$, melt flow rate $Q'=2.0\text{ g/s}$).

分布がロール間の中心線に関して対称と仮定しているため、**Fig.1** には、式(1)で定義される流れの関数(Ψ)を用いて、ロール間隙の片側領域における変形流動の流線を描いた。

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} = -2v_x/q, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial x} = 2v_y/q \quad (1)$$

ここで、 v_x と v_y は各々鋳造方向(x 方向)および厚さ方向(y 方向)の速度、 q は試料単位幅当たりの体積流量である。**Fig.1** より、ロールに接触した融体はいったんロール壁側へ引き寄せられるように流れ、図中破線で示した固相線上で凝固を完了し、その後凝固金属が圧延流動する様子が理解される。鋳造方向の速度は最小ロール間隙の位置($x=0$)で最大となるが、ロール間距離が鋳造方向に向って狭くなるため融体領域に循環流が生ずる。

他の操作条件を一定にして、ロール回転速度を 33.3 s^{-1} (2000 rpm) に増加した場合のフローパターンの推算結果を **Fig.2** に示す。前報⁽¹⁾で示したように、設定ロール間距離と融体流量を一定にしてロール回転速度だけを増加すると、試料の圧延速度や単位幅当たりの体積流量が増加するために、試料の厚さと幅が減少する。**Fig.1** と 2 の比較から、本計算条件下では、ロール回転速度の増加に伴って融体がロールに接触開始する位置($x=-x_4$)と凝固完了位置($x=x_2$)が下流側へ移動し、これらの位置におけるロー

Fig.2 Flow pattern between rolls estimated for roll rotation speed of 33.3 s^{-1} (2000 rpm). ($2H_0=50 \mu\text{m}$, $Q'=2.0 \text{ g/s}$)

Fig.3 Distributions of mean temperature in casting direction. ($2H_0=50 \mu\text{m}$, $Q'=2.0 \text{ g/s}$)

ル間距離即ち試料の厚さが減少する。また、接触開始位置から凝固開始位置($x=-x_3$)までの距離は回転速度の増加に伴って長くなる。これは、注湯温度が一定の場合、回転速度の増加に伴って casting 方向の温度変化が小さくなるためである。

ロール間隙における試料内断面平均温度($\bar{T}$)の casting 方向に対する変化を Fig.3 に示す。同図より、試料内断面平均温度は融体とロールの接触開始位置から低下し、途中凝固の進行に伴う潜熱の放出のため降下速度が停滞するが、凝固完了位置より再び急速に低下することがわかる。図中、計算パラメータとしてロール回転速度を変化させてあるが、回転速度の増加に伴って接触開始位置から凝固完了位置までの距離が大きくなり、出口位置における試料温度が高くなる。また、一般に本プロセスでは、casting 方向における試料内断面平均温度の勾配($d\bar{T}/dx$)が回転速度の増大に伴って減少することがわかる。

Fig.3 より、回転速度を余りにも大きくすると、凝固を完了しないうちに試料金属がロール間隙を通過すると考えられる。一方、回転速度の減少に伴う出口位置での試料温

度の低下は、試料からロールへの伝熱量が増加するためにロール温度のより早い上昇をもたらす、冷却媒体としてのロールの冷却能力が低下することを意味する。また、組織の微細化や非晶質化を目的とするならば、凝固後の試料の過度な冷却はロールの冷却能力の維持にとって不利となる。したがって、双ロール法により薄帯状急冷金属を製造する場合、ロール間隙での凝固の完了とロール温度上昇の抑制に対して最適なロール回転速度が存在すると考えられる。

注湯温度が一定の場合、出口位置における試料温度はロールと試料の接触時間に依存する。試料金属がロール間隙における $x=a$ の位置から $x=b$ の位置まで移動するのに要する平均時間、即ちロール表面との平均接触時間 $\bar{t}(a, b)$ は式(2)で与えられる。

$$\bar{t}(a, b) = \frac{2}{q} \left[(H_0 + R)(b-a) - \frac{1}{2} \left\{ b\sqrt{R^2 - b^2} - a\sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \left(\arcsin \frac{b}{R} - \arcsin \frac{a}{R} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 H_0 は圧延時のロール間距離、 R はロール半径を示す。Fig.3 の条件を使い、融体とロールの接触開始位置から試料出口位置までの区間における平均接触時間 $\bar{t}(-x_4, x_1)$ を式(2)から求めた結果、8.3, 16.7, 25.0 および 33.3 s^{-1} (500, 1000, 1500 および 2000 rpm) のロール回転速度に対して各々、13.0, 5.0, 2.8 および 2.1 ms の値が得られ、平均接触時間はロール回転速度の増加に伴って急激に短くなることがわかった。

本プロセスでは、ロール間隙で融体と凝固金属が圧延によって変形流動する。このような流動下における試料の冷却速度は、Fig.1 や 2 に示される流線に沿って温度変化を計算することより求められるが、casting 方向のみならず厚さ方向にも変化する。ここでは、冷却速度に及ぼす操作変数の効果を比較検討する際の便利さを考慮して、試料の冷却速度を式(3)で定義した。

$$Re = |d\bar{T}/dt| = \bar{v}_x \cdot |d\bar{T}/dx| \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 $\bar{v}_x$ と $\bar{T}$ は各々 casting 方向速度と温度の試料断面平均値であり、冷却速度 Re は距離 x の関数である。

ロール回転速度の効果を調査した一連の実験に対する冷却速度の推算結果を Fig.4 に示す。同図において、 $\bar{Re}_l$ は融体がロールに接触し始める位置から凝固開始位置までの融体領域における冷却速度 Re の平均値であり、 $\bar{Re}_s$ は凝固完了位置から断面平均温度が凝固温度よりも 20 K 低下する位置までの固相領域における平均値である。Fig.4 より、本実験条件下では、ロール回転速度の増加に伴って $\bar{Re}_s$ は単調に増加するが、 $\bar{Re}_l$ は回転速度が約 35 s^{-1} (2100 rpm) 付近で最大になることがわかる。回転速度の増加に伴う $\bar{Re}_s$ の増加は、回転速度の増加に伴って凝固完了位置が下流側へ移動し、この位置での試料厚さが減少することに対応している。式(3)において、ロール回転速度の増

Fig.4 Effects of roll rotation speed on average cooling rates in melt and solid regions. ($2H_{00}=50\text{ }\mu\text{m}$, $Q'=2.0\text{ g/s}$)

加に伴い試料の鋳造方向速度($\bar{v}_x$)は増加するが、温度勾配($d\bar{T}/dx$)は減少する。回転速度の変化に対する冷却速度 R_c の増減は $\bar{v}_x$ と $d\bar{T}/dx$ の増減の程度に左右されるため、Fig.4に示されるように $\bar{R}_{c,l}$ の最大値が存在することになる。

前述の凝固組織の調査より Photo.2 の実験ではロール回転速度が 37.5 s^{-1} (2250 rpm)付近で冷却速度が最大になると推定された。一方、その実験条件に対応する冷却速度の推算結果は、Fig.4からわかるように、回転速度が 35 s^{-1} (2100 rpm)付近で融体領域の平均冷却速度 $\bar{R}_{c,l}$ が最大になることを示しており、冷却速度に及ぼすロール回転速度の効果に関する推算結果は凝固組織の調査結果と定性的に一致している。

なお、Photo.2とFig.4は設定ロール間距離が $50\text{ }\mu\text{m}$ の場合の結果であるが、他の条件が一定で設定ロール間距離を $60\text{ }\mu\text{m}$ にした場合、冷却速度が最大となるロール回転速度は $50\text{ }\mu\text{m}$ の場合よりも小さくなり、 $33.3\sim 37.5\text{ s}^{-1}$ の範囲に存在することを凝固組織調査より確かめた。また、冷却速度の推算より、融体領域の平均冷却速度が最大となるロール回転速度は、設定ロール間距離の増大に伴って小さくなることがわかった。

冷却速度に及ぼす設定ロール間距離の効果を Fig.5 に示す。同図より設定ロール間距離の増大に伴い、融体領域の平均冷却速度 $\bar{R}_{c,l}$ は減少し、一方、固体領域の $\bar{R}_{c,s}$ は増加することがわかる。この $\bar{R}_{c,s}$ の増加は、設定ロール間距離の増大に伴って凝固完了位置がロール間隙の下流側へ大きく移動するため、圧延時のロール間距離の増加にもかかわらず凝固完了位置における試料の厚さが減少することに対応している。一方、融体領域の平均冷却速度 $\bar{R}_{c,l}$ は

Fig.5 Effects of initial roll gap on average cooling rates in melt and solid regions. ($\omega_0=20.8\text{ s}^{-1}$ (1250 rpm), $Q'=2.7\text{ g/s}$)

Fig.6 Effects of melt flow rate on average cooling rates in melt and solid regions. ($\omega_0=20.8\text{ s}^{-1}$ (1250 rpm), $2H_{00}=55\text{ }\mu\text{m}$)

設定ロール間距離の増加に伴って低下しているが、この推算結果は前述の凝固組織調査(Photo.3)で推定された冷却速度の特性と定性的に一致している。したがって、試料の凝固組織と密に関連する冷却速度として融体領域における冷却速度の平均値を採用すれば、実験で得られた凝固組織と操作変数との関係を定性的に説明できる。

冷却速度に及ぼす融体流量の効果を Fig.6 に示す。同図において、平均冷却速度の $\bar{R}_{c,l}$ と $\bar{R}_{c,s}$ はともに融体流量の増加に伴ってわずかに減少している。融体流量を増加させた場合、試料出口位置や凝固完了位置の変化がきわめて小さく、試料幅は融体流量にほぼ比例して大きくなる

が、厚さの増加はわずかである。このため、前述の式(3)中の casting direction velocity ($\bar{v}_x$) と温度勾配 (dT/dx) の変化も小さく、液相領域の $\bar{R}_{c,l}$ は融体流量の変動に対して小さな変化しか示さないことになる。なお、Fig.6 における固相領域の $\bar{R}_{c,s}$ の増減は、ロール回転速度や設定ロール間距離の効果の場合と同様に、凝固完了位置における試料厚さの増減に対応している。

IV. 結 言

双ロール法により作製した薄帯状急冷金属試料の組織調査と数学的モデルに基づいた試料の冷却速度の推算を行ない、本急速凝固プロセスの冷却特性について検討した。結果は以下の通りである。

(1) 本研究で採用した Pb-Sb 共晶合金の凝固組織と冷却速度の関係に関して、簡便な融体急冷実験の結果、融体の冷却速度の増大に伴って共晶組織中の Sb 成分を多く含む白色相が粒状化し、その平均粒径が小さくなることがわかった。

(2) 双ロール法で得られた試料の組織を比較観察し、Sb の多い白色粒状組織の平均粒径と面積割合はあるロール回転速度の時に最小となり、設定ロール間距離の減少に伴って減少することを明らかにした。融体流量については、採用した実験条件の範囲内でその値を変えても凝固組織に顕著な差異が見られなかった。なお、本プロセスでは、ロール回転速度と設定ロール間距離がともに小さいほど、ロール間隙で凝固した金属の圧下率が大きくなるため、試料の組織に凝固直後の圧延変形の影響が現われやすくなると考えられる。

(3) 数学的モデルに基づく推算の結果、ロール間隙における融体領域の平均冷却速度は設定ロール間距離の減少に伴って大きくなるが、ロール回転速度に対してはある回転速度で最大となることがわかった。この推算結果は、Sb の多い白色粒状組織に着目した組織観察から得られたものと定性的に一致している。

なお、数値計算には大型電算機(名古屋大学大型計算機センター FACOM M200)を利用した。最後に、本研究の一部は日本鉄鋼協会石原・浅田研究助成金によったことを付記し謝意を表します。

文 献

- (1) 宮沢憲一, 長 隆郎, 井上道雄: 日本金属学会誌, **46**(1982), 944.
- (2) I. Müller: Metall., **33**(1979), 929.
- (3) G.R.Kotler, K.W.Casey and G.S.Cole: Met. Trans., **3**(1972), 723.
- (4) H.Bode und K.Löhberg: Z. Metallk., **70**(1979), 445.
- (5) T.W.Clyne and A.Garcia: J. Mater. Sci., **16**(1981), 1643.
- (6) K.Inomata, S.Shimanuki and M.Hasegawa: Japan. J. Appl. Phys., **19**(1980), L625.
- (7) K.Miyazawa and J.Szekely: Met. Trans., **12A**(1981), 1047.
- (8) M.Hansen: *Constitution of Binary Alloys*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, (1958), 1101.
- (9) C.B.-Gautier, B.C.Giessen and N.J.Grant: J. Chem. Phys., **48**(1968), 1905.
- (10) W.A.Tiller: *Liquid Metals and Solidification*, ASM, Cleveland, Ohio, (1958), 276.
- (11) W.M.Rumball and V.Kondic: *The Solidification of Metals*, ISI, London, (1967), 149.