

## 討16 高珪素鋼急冷薄帯の凝固と特性

川崎製鉄㈱ 技術研究本部 ○小菊史男 小沢三千晴 渋谷 清  
 宍戸 浩 菅 孝宏

### 1. 緒言

急速凝固法によって溶鋼から直接薄板を製造する技術は、急冷によって実現する物性と製板工程短縮の観点から、近年とみに注目されている。急速凝固法で得られる結晶質合金薄帯の特徴は

- ① 固溶限の拡大
- ② 偏析、粒子析出の減少
- ③ 結晶組織の微細化
- ④ 集合組織が  $\{100\} <0vw>$
- ⑤ 難加工性材の薄板化
- ⑥ 薄板製造工程の短縮

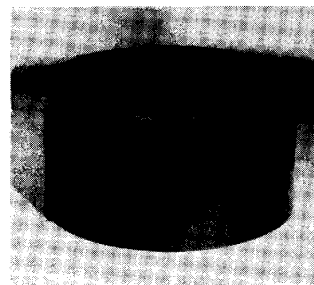


Photo. 1 RS (Rapidly Solidified) Strip Coil

をあげることができる。<sup>(1)</sup>

上記利点を活かし、難加工性材であるが磁気特性に優れた高珪素鋼急冷薄帯を、双ロール法により作成した。作成した薄帯を Photo. 1 に示すが、高珪素鋼急冷薄帯は磁気特性に優れるのみならず、機械的にも優れている。

本報告では双ロール法によって直接製板した高珪素鋼急冷薄帯の凝固、ならびに材料特性について検討した結果を述べる。

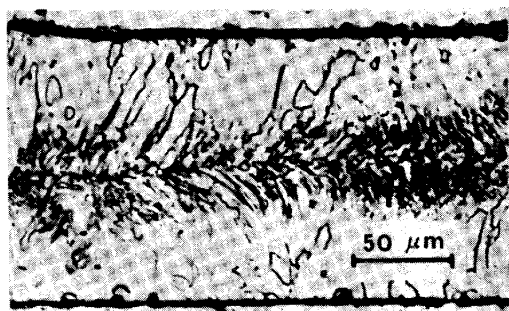
### 2. 作成条件

4.5～5.5 wt% Si の高珪素鋼を内部水冷した双ロールに注湯し、急速凝固した。ロール径：400～550 mm、ロール周速：3～12 m/sec、薄帯厚：120～500 μm である。

### 3. 実験結果、考察

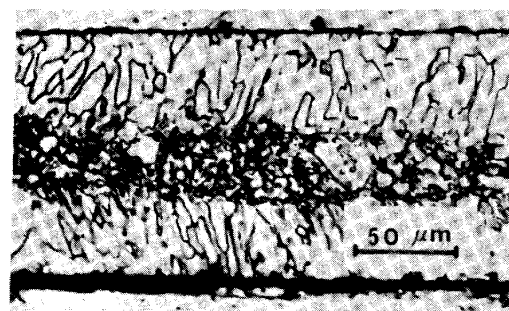
#### 3.1 急冷薄帯の凝固組織

急冷薄帯凝固組織の例を Photo. 2、3 に示す。Photo. 2 は微細柱状晶が両表面から発達し、ほぼ板厚中央で凝固完了している例、一方 Photo. 3 は両表面から発達した微細柱状晶は中心部に達せず、中心部は粒状晶となっている例である。



← roll revolution direction

Photo. 2 Structure of RS Strip  
 (Without equiaxed Zone)



← roll revolution direction

Photo. 3 Structure of RS Strip  
 (With equiaxed Zone)

凝固組織のこのような差異は、Fig. 1に示すようなロールのミスアライメントやヒートクラウンによって生ずるものと考えられる。すなわちロールギャップがFig. 1の (B)、(C)のような場合、a点で示すギャップの大きい部分で形成される薄帯には、双ロールより離脱した後も、中心部に未凝固が残り、それが粒状晶になると言える。

### 3.2 急冷薄帯の冷却速度

Photo. 4に示すように急冷薄帯で観察される dendライトの一次アーム間隔は1~7 μmで、薄帯表面に近いほど微細である。

岸武ら<sup>(2)</sup>は珪素鋼をはじめ各種合金鋼 dendライトアーム間隔について研究し、一次 dendライトアーム間隔と冷却速度の関係が(1)式で表わされることを示した。

$$d_1 = 110 [mC(k-1)]^{1/6} / V^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

- ここで
- $d_1$  : 1次アーム間隔
  - $m$  : 液相線勾配
  - $C$  : 溶質濃度
  - $k$  : 平衡分配係数
  - $V$  : 冷却速度

(1)式が急速凝固に適用できると仮定すると、本方法での冷却速度は $10^3 \sim 10^4 K/sec$ と推定される。

この数値の妥当性を検討するため、双ロール法急速凝固の伝熱計算を行なった。計算は冷却ロールと溶鋼を含む擬2次元の伝熱モデルを用い、ロールの回転に従って逐次凝固伝熱計算を1次元で行なった。冷却ロールと溶鋼間の熱伝達係数は、 $1.67 cal/sec \cdot cm^2 \cdot K$ とした。

計算から求めた薄帯厚み方向の冷却速度の変化をFig. 2に実線で示した。図中○印は dendライトアーム間隔を測定し、(1)式によって求めた値である。凝固計算と(1)式から求めた値は良く一致しており、 dendライトアーム間隔と冷却速度の関係を表す(1)式は急速凝固領域でも適用できる可能性を示している。

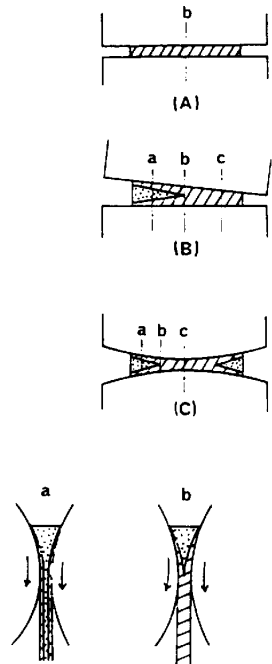


Fig. 1 Solidification model of the double-roller method  
 (A) Uniform solidification section -- a. Semi-solidification type  
 (B) Mis-alignment b. Ideal solidification type  
 (C) Heat crown c. Rolling type

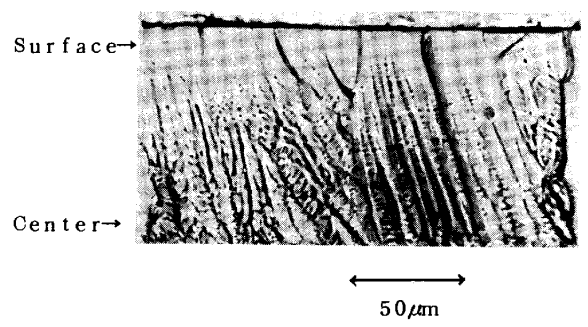


Photo. 4 Dendritic Structure  
 (4.5wt%Si-Fe)

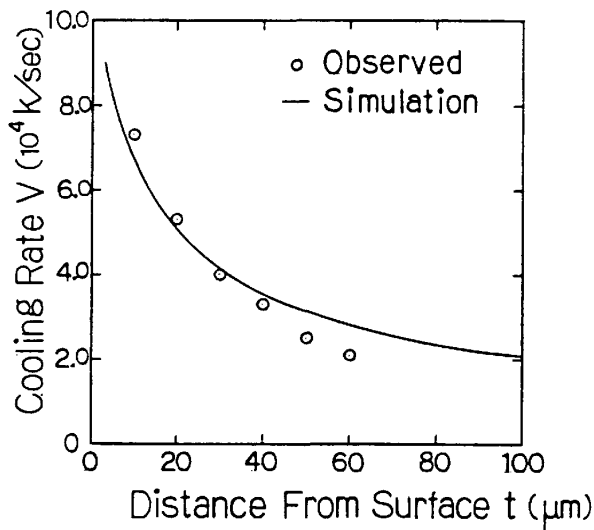


Fig. 2 Relation between Cooling Rate and Distance from RS strip Surface

#### 4. 高珪素鋼急冷薄帯の特性

##### 4.1 鉄損

Fig. 3に鉄損の角度依存性を方向性珪素鋼板、無方向性珪素鋼板と比較して示す。無方向性珪素鋼板といえども鉄損は角度依存性を残しており、鉄損直角方向比 ( $L/C$ ) は約 1.37 である。これに対して高珪素鋼急冷薄帯は低鉄損で、かつ  $L/C$  比は 1.06 であり、ほぼ完全無方向性材と評価できる。

このような磁気特性が得られる理由は以下のように理解できる。Fig. 4は高珪素鋼急冷薄帯の凝固から焼鈍までの組織変化を示したものである。結晶粒は板厚中心層から急速に成長している。集合組織は as cast から焼鈍後の状態に至るまで  $\{100\} \langle 0VW \rangle$  が観察されている。このような集合組織を示す材料は板面内に磁化容易軸を含むものであり、磁気的には面内無方向性を実現するものである。

##### 4.2 機械的特性

鋼板の抗張力や降伏応力などの強度を高める方法は固溶強化、細粒化、析出強化等いずれをとっても磁化を困難にする。しかし珪素鋼の場合は、珪素含有量の増加に伴って軟磁性が改善されると同時に、機械的特性も向上する。Fig. 5に抗張力、降伏応力の測定結果を示した。珪素含有量の増加によって抗張力、降伏応力ともに増大し、珪素含有量が 5.5%

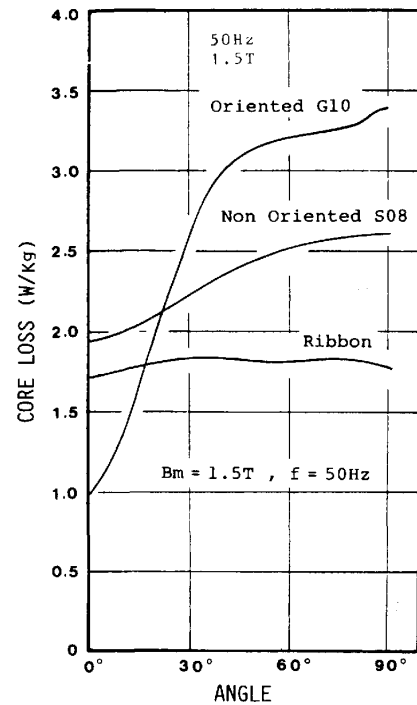


Fig. 3 Relation between Core Loss and Angle from Longitudinal Direction

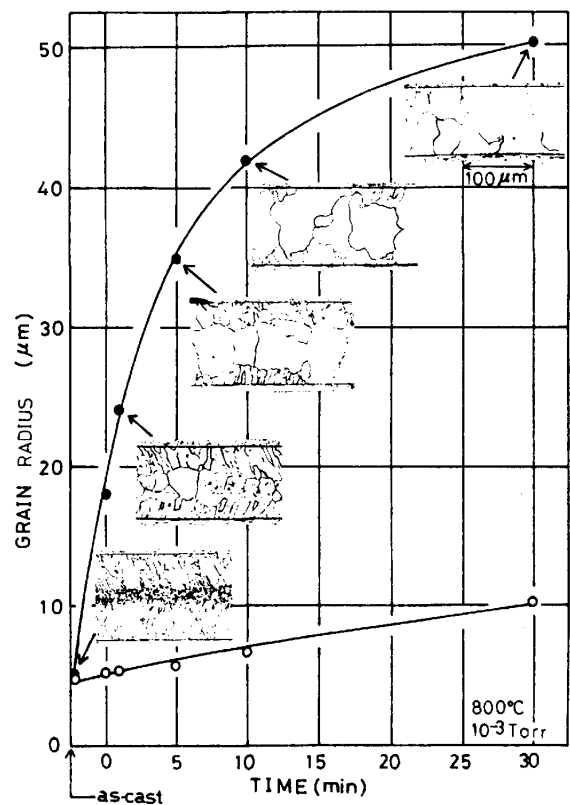


Fig. 4 Grain growth at 800°C

付近になると、抗張力と降伏応力の値が近づき、幾分伸びが小さくなる。冷間圧延による珪素鋼板は珪素含有量3.5%がほぼ最大限であるから、4.5%珪素鋼急冷薄帯は約 $10 \text{ Kg/mm}^2$ の抗張力、降伏応力が強くなっている。

5. まとめ

高珪素鋼急冷薄帯の凝固組織は、薄帯表面から発達した柱状晶を示し、鑄込条件の違いにより中心部に粒状晶を生ずることがある。

双ロール法で急冷薄帯を作成する時の冷却速度は $10^3 \sim 10^4 \text{ K/sec}$ であると推定される。また冷却速度は薄帯表面に近いほど大きいことがわかった。

磁性についてはほぼ完全な面内無方向性を示し、機械的には、現行珪素鋼板に比べて抗張力、降伏応力ともに向上している。

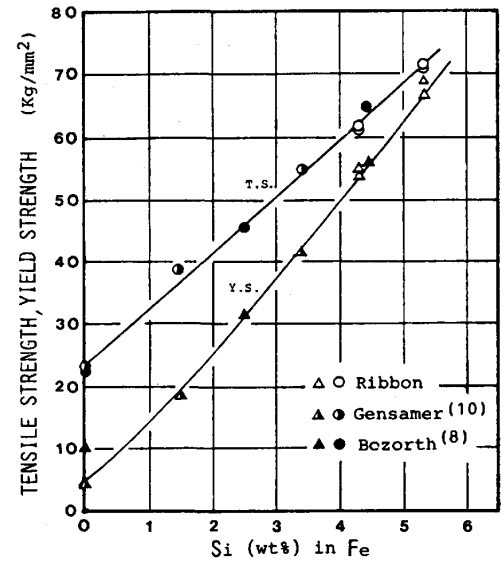


Fig. 5 Effect of Si in Fe on tensile strength and yield strength

参考文献

- (1)新宮秀夫・石原慶一、鉄と鋼、69 (1983)、P1087
- (2)岸武勝彦・岡本 平、鉄と鋼、63 (1977)、P425