

オーステナイト系ステンレス鋼連続スラブの凝固組織におよぼす電磁攪拌の影響

竹内 英磨*・松村 省吾*・池原 康允*
 駒野 忠昭*・柳井 隆司*

The Effects of Electromagnetic Stirring on Cast Structure of Continuously Cast Austenitic Stainless Steel Slabs

Hidemaro TAKEUCHI, Shogo MATSUMURA, Yasunobu IKEHARA
 Tadaaki KOMANO, and Takashi YANAI

Synopsis :

Effects of electromagnetic stirring on cast structure of continuously cast austenitic stainless steel slabs were investigated to improve the macropattern of plates by grain refinement of cast structure. The following results were obtained: (1) It was shown that cast structure of austenitic stainless steel slabs can be refined by electromagnetic stirring at high casting temperature. The proper conditions for obtaining a high ratio of equiaxed crystals were ascertained. (2) The qualities of austenitic stainless steel plates manufactured by continuous casting with electromagnetic stirring were improved and homogeneous macro structure of plates were obtained at low reduction.

1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼連続铸造スラブから製造した厚板は、機械的性質、表面性状および耐食性については鋼塊材と同等であるが、低加工比の場合、铸造組織の残存によるマクロパターンが発生し^{1)~3)}適用板厚が制限される場合がある。

そこで、オーステナイト系ステンレス鋼連続铸造スラブから製造した厚板のマクロパターンを凝固組織微細化により改善し、連続スラブの適用板厚拡大を目的として、連続スラブの凝固組織におよぼす電磁攪拌の影響を調査した。

その結果、安定して高等軸晶率を得る電磁攪拌条件を見出し、厚板のマクロパターン改善効果を得たので報告する。

2. 試験条件および調査方法

2.1 電磁攪拌装置および取り付け位置

Table 1 に電磁攪拌機の主仕様を示す。電磁攪拌機は、周囲環境に耐えるために全閉防塵防滴型構造を有する3相交流移動磁界形攪拌機である。この攪拌機を垂直型スラブ連続機の2nd ローラーエプロン内に設置し

Table 1. Main specifications of the electromagnetic stirrer.

Item	Specifications
Capacity	720 k.V.A.
Terminal voltage	360~420 V
Rated current	1 150~1 420 A
Frequency	60 Hz
No. of phase	3
Core interval	210~310 mm
Stirring intensity	60~205 mmFe
Stirring mode	Continuous or alternate

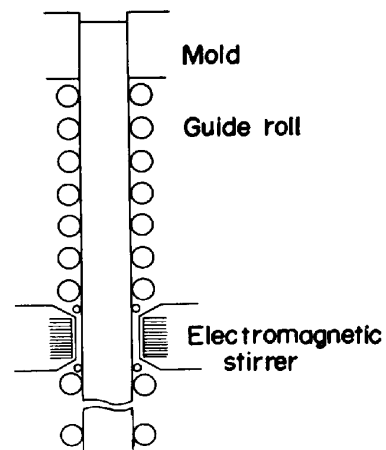


Fig. 1. Position of electromagnetic stirrer with respect to the strand.

昭和 57 年 1 月 7 日受付 (Received Jan. 7, 1982)

* 新日本製鉄(株)光製鉄所 (Hikari Works, Nippon Steel Corp., 3434 Oaza-Shimada Hikari 743)

Table 2. Continuous casting and electromagnetic stirring condition of austenitic stainless steel slabs.

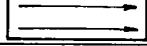
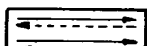
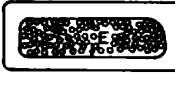
Steel grade	Casting condition				Electromagnetic stirring condition		
	Slab size	Casting temperature	Casting speed	2nd cooling water	Setting position	Stirring mode	Stirring intensity
SUS 304 SUS 304L SUS 321 SUS 316 SUS 316L	mm ² 130X1060 130X1260	ΔT: 20~50°C (Super heat)	mm/min 850~ 1000	l/kg 2.7~3.1	upper lower	Continuous  Alternate  on-time 3~10sec off-time 1~5sec	27~205mm Fe at slab center

Table 3. Identification of solidification structure of austenitic stainless steel slabs.

Steel grade	Etching	Surface preparation	Measurement of solidification structure	
			Ratio of equiaxed dendrite zone = $\frac{E}{D} \times 100$ (%)	
SUS 304 304L 321	5g FeCl ₃ 300ml H ₂ O 5g CuCl ₂ 80ml C ₂ H ₅ OH 100ml HCl	Miller finish	Ratio of equiaxed dendrite zone = $\frac{E}{D} \times 100$ (%)	
SUS 316 316L	HCl : H ₂ O : H ₂ O ₂ = 1 : 1 : 1/2	320# finish	Ratio of equiaxed crystal zone = $\frac{E}{D} \times 100$ (%)	

た。

連铸機への電磁攪拌機取り付け状況を Fig. 1 に示す。

2.2 試験条件範囲

Table 2 に試験対象鋼種と铸造試験条件範囲を示す。これらのオーステナイト系ステンレス鋼 5 鋼種を铸造し、連铸スラブ凝固組織におよぼす铸造条件と電磁攪拌条件の影響を調査した。

2.3 等軸晶率測定方法

試験対象鋼種についてマクロ組織と凝固組織の比較検討を行った結果、オーステナイト (γ) で凝固し変態しない SUS 316 と SUS 316L は、マクロ組織と凝固組織は一致するのに対して、初晶がデルタ (δ) で凝固し γ に変態する SUS 304, SUS 304L と SUS321 は、両者に対応せず、マクロ組織と凝固組織は無関係であることがわかった。そこで、凝固組織の顕出は、Table 3 に示す条件で行い、SUS304 系については、デンドライト組織、SUS 316 系については、マクロ組織を観察した。等軸晶率は、厚み比率で表した。

3. 試験結果および考察

3.1 凝固組織におよぼす電磁攪拌の影響

3.1.1 凝固組織形態

SUS 304 および SUS 316 の凝固組織を無攪拌と攪拌スラブを対比して Photo. 1 および 2 に示す。

(1) SUS 304 系スラブ；無攪拌铸造の場合、表層から中心まで柱状デンドライトが成長し、スラブ中心部に

一部粗大等軸デンドライトが生成しており、収縮孔も認められる。デンドライト幹に δ-フェライトが生成している。攪拌铸造の場合、攪拌機位置に担当する凝固シェル厚に、ホワイトバンドが生成し、攪拌域内は完全等軸デンドライト組織を示し、かつ中心部収縮孔も消失している。δ-フェライトは、等軸デンドライト幹に円形群状に生成している。

(2) SUS 316 系スラブ；無攪拌铸造スラブは、完全な柱状晶組織を示すのに対して、攪拌铸造スラブは、攪拌域内は完全な等軸晶組織を示し、かつ攪拌域外に生成する柱状晶の幅も細かくなつており、大幅な凝固組織の改善が達成された。

3.1.2 過熱温度 (ΔT°C) と攪拌機位置の影響

SUS 304 および SUS 316 連铸スラブの等軸晶率におよぼす過熱温度 (ΔT°C) と攪拌機位置の影響を Fig. 2 に示す。SUS 316 連铸スラブは、無攪拌铸造の場合、ΔT > 10°C では等軸晶は全く生成せず、中心部まで柱状晶の成長した凝固組織を示すのに対して、攪拌推力 H > 60 mmFe の電磁攪拌により ΔT = 20~50°C の高温铸造においても、上部攪拌で 50~60% また下部攪拌で 30~40% の等軸晶率が得られた。

SUS 304 連铸スラブは、SUS 316 と同様に、攪拌堆力 H > 60 mmFe において、ΔT = 35~55°C の範囲で ΔT の影響はほとんど認められず、上部攪拌で 40~50%、下部攪拌で 30~35% の等軸晶率が得られた。

3.1.3 攪拌強度の影響

SUS 304 と SUS 316 連铸スラブの等軸晶率におよ

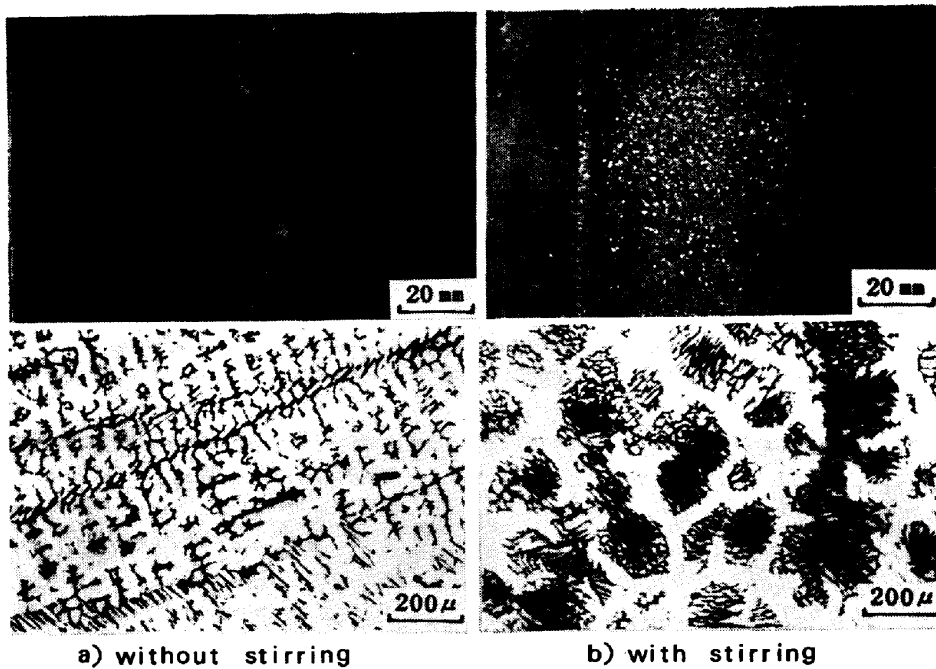


Photo. 1. Cast structure of SUS304 continuously cast slabs.

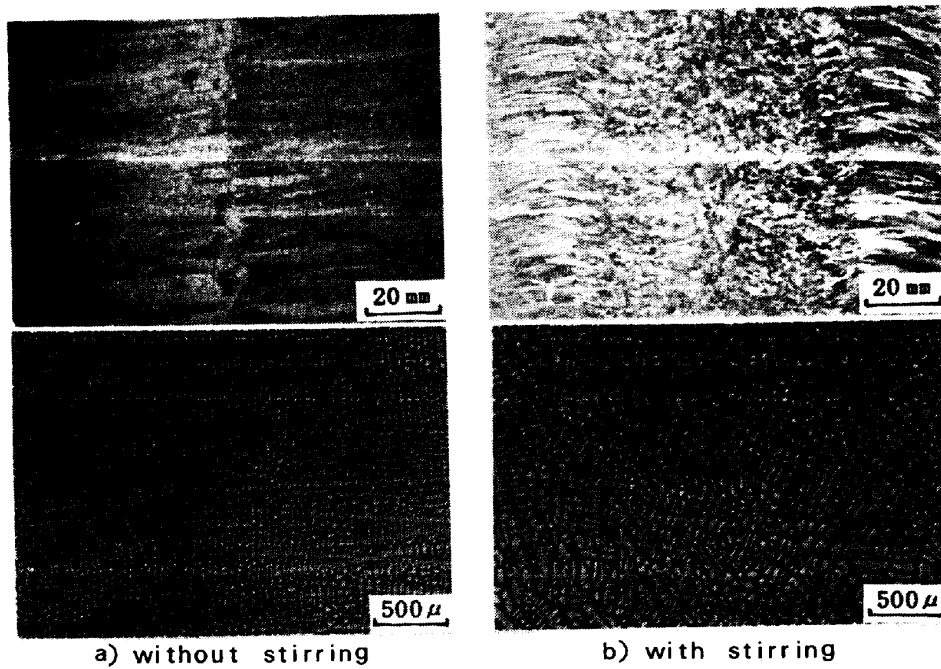


Photo. 2. Cast structure of SUS316 continuously cast slabs.

ぼす攪拌強度の影響を Fig. 3 に示す。上部攪拌において、SUS 304 は攪拌強度 $H > 40 \text{ mmFe}$ 、SUS 316 は $H > 50 \text{ mmFe}$ で、攪拌域内は完全等軸晶化した。攪拌強度が、低い場合、ほとんど等軸晶化しないかあるいは粗大等軸晶が中心部に認められるのみであり、柱状晶から微細等軸晶に急激に変化する臨界値が存在することが明らかになった。下部攪拌において、攪拌強度 $160 < H < 200 \text{ mmFe}$ の強い攪拌にもかかわらず、攪拌域内のみ

等軸晶化し、上部方向への攪拌域の拡がり是非常に小さいことを示した。

3.1.4 攪拌パターンの影響

Fig. 4 に SUS 316 スラブの等軸晶率におよぼす攪拌パターンの影響を示す。連続的に一方向攪拌を行う正々連続攪拌と攪拌方向を一定時間ごとに逆転させる正々交番攪拌パターンの等軸晶率におよぼす影響は、ほとんど認められない。しかし、SUS 316 スラブ断面の等軸

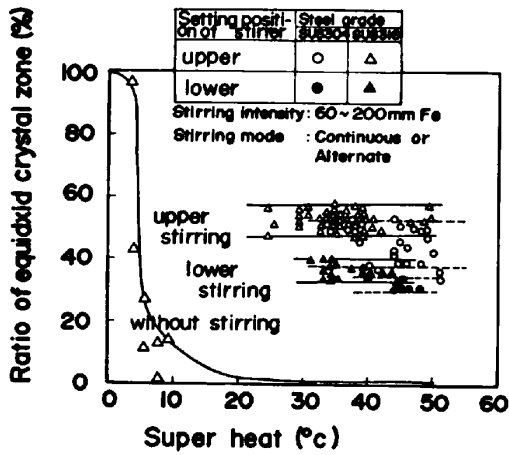


Fig. 2. Effect of super heat (ΔT) and setting position of stirrer on equiaxed crystal zone ratio of austenitic stainless steel slabs.

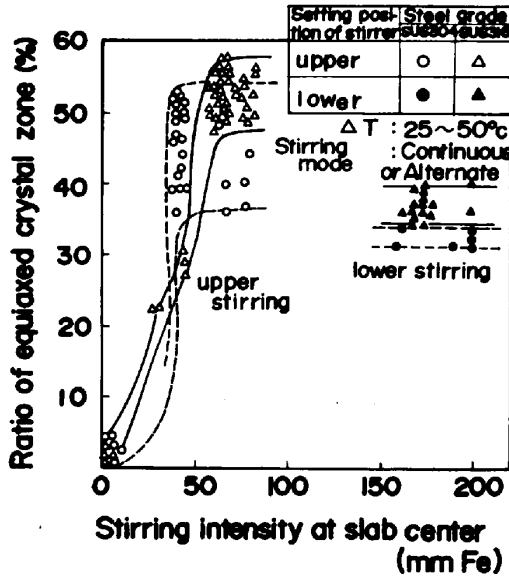


Fig. 3. Effect of stirring intensity on equiaxed crystal zone ratio of austenitic stainless steel slabs.

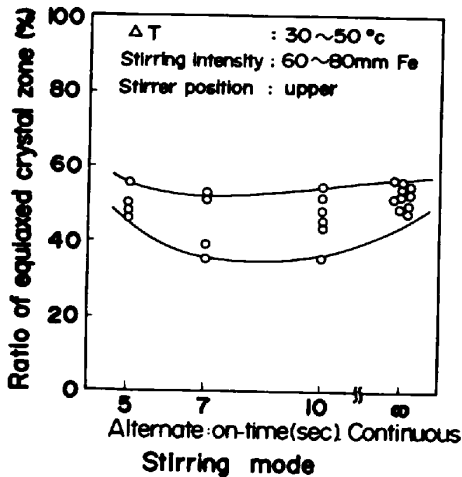


Fig. 4. Effect of string mode on equiaxed crystal zone ratio of SUS316 slabs.

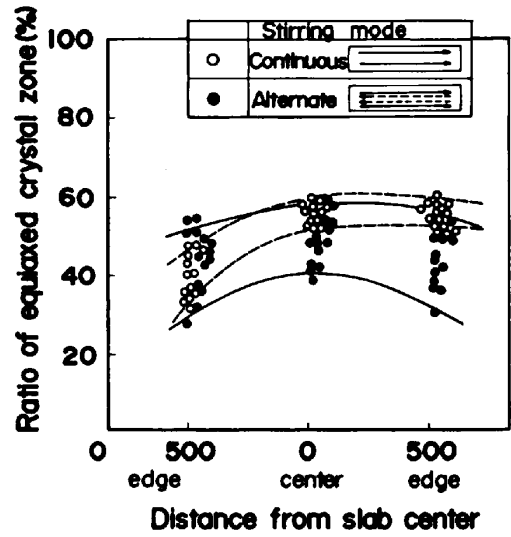


Fig. 5. Relation between stirring mode and distribution of equiaxed crystal zone.

晶率分布と攪拌パターンとの関係を Fig. 5 に示すように、正々交番攪拌パターンは等軸晶率が断面均一になるのに対して、正々連続攪拌パターンのスラブ等軸晶率は、スラブ両端で約 15% の差異を生じており、攪拌流の衝突する側で等軸晶率が增大している。

3.2 偏析におよぼす電磁攪拌の影響

3.2.1 ミクロ偏析

SUS 304 と SUS 316 電磁攪拌スラブのミクロ偏析挙動を、EPMA により調査した。EPMA の測定ビーム径は 1μ であり、ミクロ偏析度を $I_s = C_M / C_m$ で表した。

ただし、 C_M : デンドライト樹間の最大元素濃度
 C_m : デンドライト幹の最小元素濃度

である。

1) SUS 304 ; SUS 304 のミクロ偏析挙動を凝固組織と対比して Photo. 3(a) に示す。SUS 304 のミクロ偏析は、デンドライト軸では、Cr が最大 Ni が最小濃度を示し、樹間では Cr が最小 Ni が最大濃度を示し、デンドライト軸には δ -Fe が析出し、Cr 富化 Ni 負化のミクロ偏析を形成している。

2) SUS 316 ; SUS 316 のミクロ偏析挙動を Photo. 3(b) に示す。SUS 316 の Cr, Ni, Mo 濃度は、デンドライト軸で最小となり、樹間で最大となり、Cr, Ni, Mo は同一の偏析挙動を示した。SUS 304 と異なり、SUS 316 の δ -Fe は、樹間に析出しており、樹間に Cr と Mo の正偏析と Ni の負偏析が認められた。SUS 316 スラブの δ -Fe 相を除いた Cr, Ni, Mo の偏析度 (I_s) を、無攪拌スラブと比較して Fig. 6 に示す。ミクロ偏析度におよぼす電磁攪拌の影響すなわち

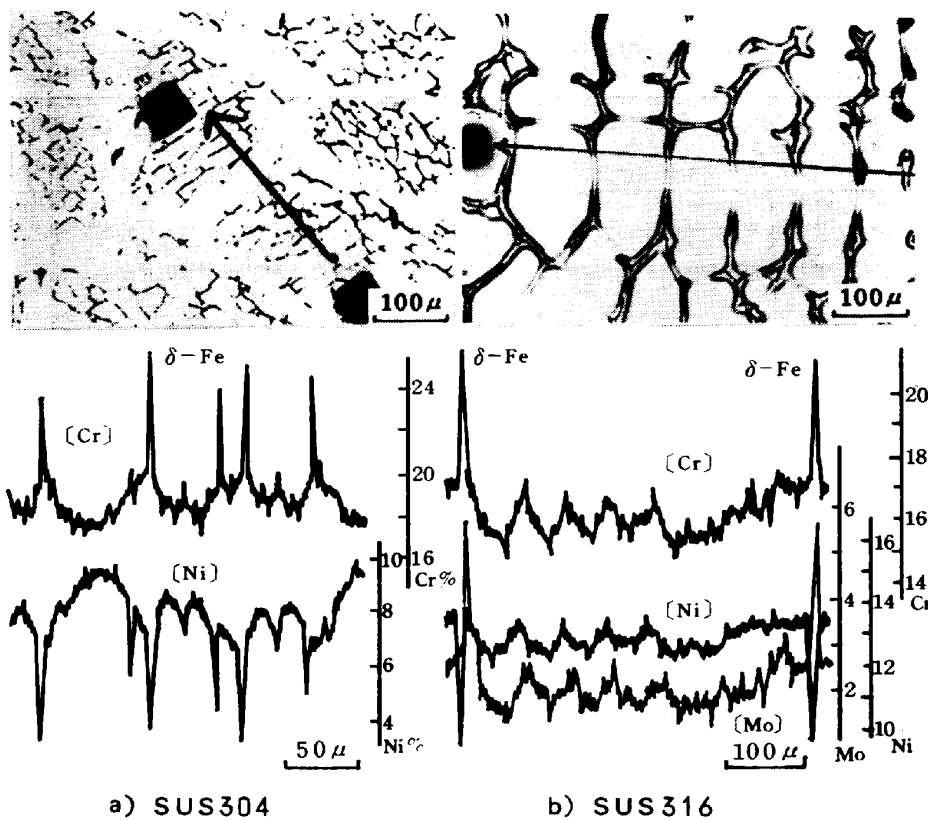


Photo. 3. Microstructure and solute distribution of continuously cast SUS304 and SUS316 slabs.

凝固組織の影響は、認められず、等軸晶率と柱状晶域でのマイクロ偏析度は、変わらず、Cr, Ni の偏析度は、1.1~1.2 で小さいが、Mo の偏析度は 2.0~2.5 を示した。

SUS 304 と SUS 316 のマイクロ偏析挙動の相違は、凝固形態の相違と密接に関係しており、Cr/Ni<1.5 の SUS 316 の場合、Fe-Cr-Ni 状態図⁵⁾ から分かるように、初晶はオーステナイト (γ) であり、Cr と Ni の平衡分配係数 (K_0) は 1 以下である。一方、Cr/Ni>1.5 の SUS 304 は、初晶は δ -フェライトであり、 $K_{0Cr}>1$, $K_{0Ni}<1$ となる。したがって、Cr/Ni=1.5 近傍を境界にして、同一成分偏析挙動を示す領域と、Cr と Ni の偏析傾向が逆転する領域に分けられる⁶⁾。SUS 304 と SUS 316 のデンドライトと δ -フェライトの位置関係の逆転も凝固形態の相違により説明される。

3.2.2 ホワイトバンド

電磁攪拌スラブの凝固組織の攪拌位置にホワイトバンドといわれる負偏析帯が存在する。ホワイトバンドは、溶鋼の攪拌流によつて固/液界面の濃化溶鋼が洗い出されて生成する負偏析帯であることはよく知られている。

SUS 304 および SUS 316 電磁攪拌スラブ断面の凝固組織エッチにより、ホワイトバンドを顕出させ、ホ

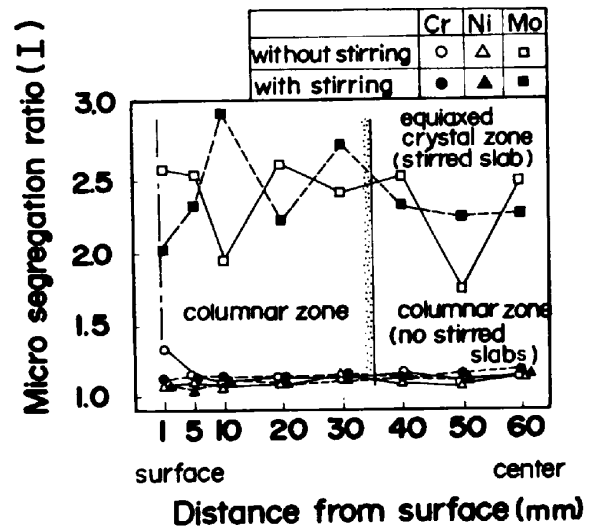


Fig. 6. Micro segregation ratio (I) over the cross section in SUS316 slabs.

ワイトバンド近傍を 1mm 間隔で切削粉を採取して化学成分分析を行い、ホワイトバンド部の負偏析状況を調査した結果を、Fig. 7(a)(b) に示す。負偏析度は、ホワイトバンド部の化学分析値と取鍋分析値の比として表した。攪拌パターンが正々連続の場合、スラブが電磁攪拌機コイル前面を通過する位置に相当する凝固厚み部分

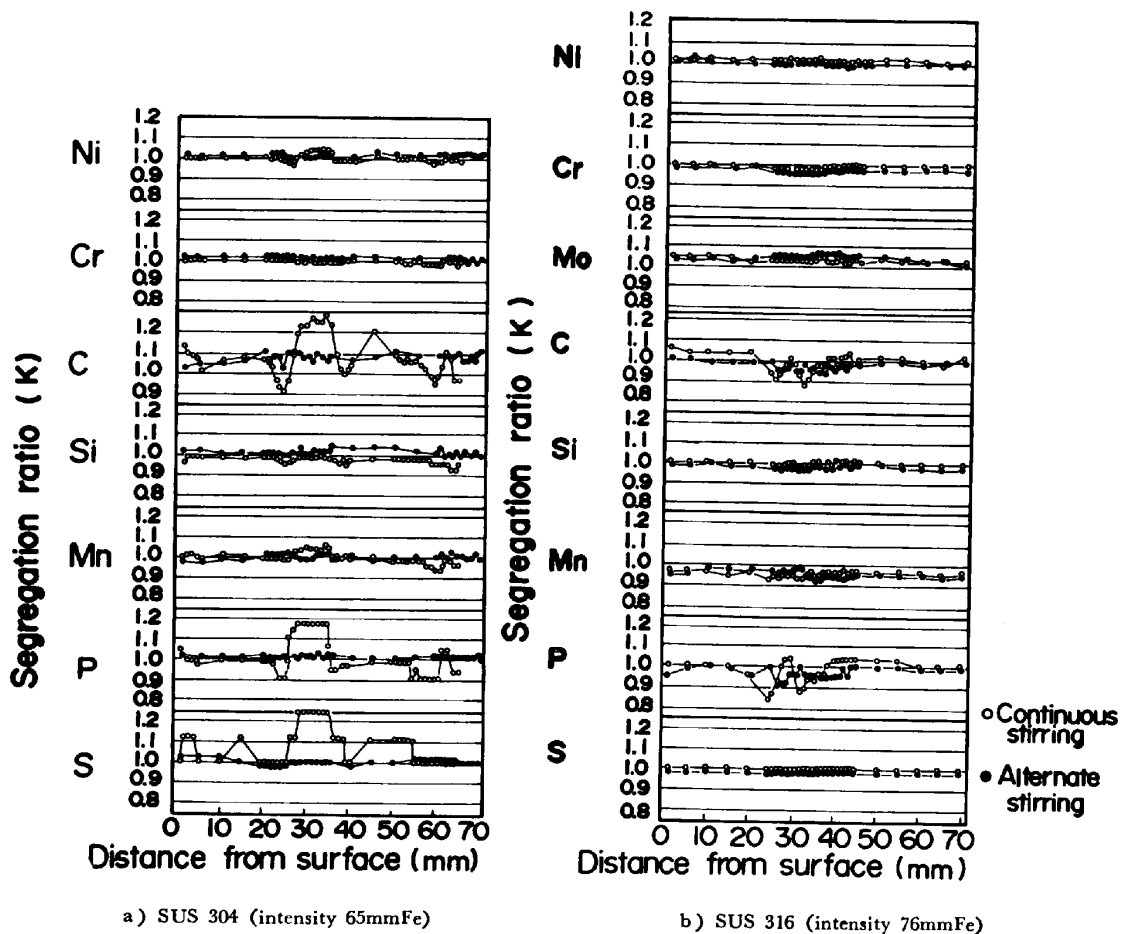


Fig. 7. Segregation ratio of some elements over the cross section of white band in stainless steel slabs.

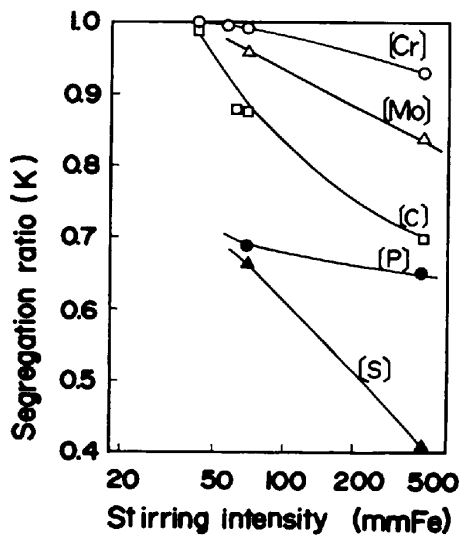


Fig. 8. Relation between stirring intensity and segregation ratio (K) of white band in stainless steel slabs.

に、もつとも明瞭なホワイトバンドが生成し、その内側では溶質元素の濃化が認められた。ホワイトバンドのプロファイルは、W型を呈し、2本の負偏析帯が認められ

た。内側のホワイト・バンドは、攪拌溶鋼流のスラブ短辺からの反転流によるものと考えられる。攪拌パターンが正々交番の場合、数本の細いホワイトバンドが生成するが、負偏析度は正々連続パターンと比較して軽度となり、かつ分散する。

ホワイトバンド部の最大負偏析度と攪拌強度との関係を Fig. 8 に示す。負偏析度は攪拌強度が大きくなるにつれて大きくなり、元素偏析傾向は、 γ 中における平衡分配係数⁷⁾から推定される順序にほぼ一致している。

3.3 電磁攪拌による厚板成品の品質向上

電磁攪拌による厚板成品のマクロパターン改善効果を Fig. 9 に示す。厚板のマクロパターン評点は、センターパーティション・ライン、ホワイトバンドおよび铸造組織残存の観点から、Photo. 4 に示す A, B, C および D ランクに分類した。

完全柱状晶組織からなる無攪拌スラブと比較して、30%以上の等軸晶を有する攪拌スラブより製造した厚板は、低圧下比においてもマクロパターンは消失し均一なマクロ組織が得られた。以上の結果、凝固組織微細化によつて、低圧下比においても厚板成品のマクロ組織は均

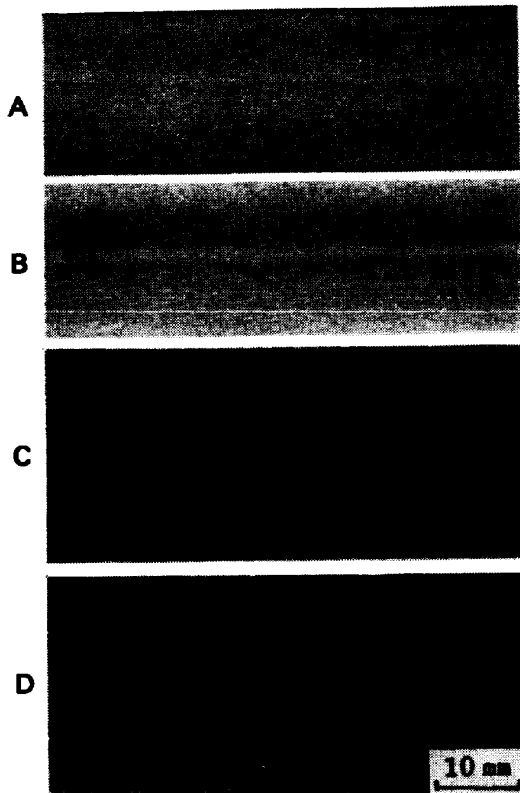


Photo. 4. Macro pattern ratings of austenitic stainless steel plates

一となり、オーステナイト系ステンレス鋼スラブの厚板適用拡大が達成された。

4. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼連铸スラブから製造した厚板のマクロパターンを、凝固組織微細化により改善することを目的として、連铸スラブの凝固組織におよぼす電磁攪拌の影響を調査した。

得られた結果は次のとおりである。

1) オーステナイト系ステンレス鋼連铸スラブの凝固組織は、過熱温度 20°C 以上の高温鑄造においても、攪拌推力 60 mmFe 以上の電磁攪拌により、攪拌域内が等

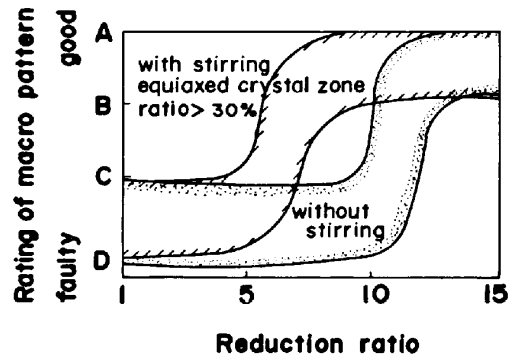


Fig. 9. Effect of electromagnetic stirring on macro pattern of plates made from continuously cast SUS316 slabs.

軸晶組織となり、等軸晶率 30% 以上のスラブが安定して得られた。

2) 電磁攪拌スラブに生成するホワイトバンド（負偏析帯）の負偏析度は、攪拌推力が増大するにつれて顕著になるが、攪拌パターンを正々交番にすることにより分散化すると同時に軽減できる。

3) 等軸晶率 30% 以上を有するスラブから製造した厚板は、低圧下比においても均一な断面マクロ組織が得られ、適用板厚は大幅に拡大された。

文 献

- 1) 小池伸吉, 日景 徹, 渡部十四雄: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, S 145
- 2) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 38 回特殊鋼部会 (1969) 日本冶金工業(株)(私信)
- 3) 小池伸吉, 山田桂三, 府川 仁, 渡部十四雄: 鉄と鋼, 57 (1971) 11, S 644
- 4) 竹内英磨, 池原康允, 柳井隆司, 松村省吾: 鉄と鋼, 63 (1977) 8, p. 1287
- 5) H. J. SCHULLER: Arch. Eisenhüttenwes., 34 (1963), p. 61
- 6) U. SIEGEL and M. GÜNZEL: Neue Hütte, 18 (1973), 10, p. 599
- 7) J. CHIPMAN: Basic open hearth steelmaking, Iron and Steel Division, AIME (1951), p. 621