

論 文

UDC 621.74.047 : 669.063.8 : 537.852 : 669.15'26-194.57 : 669.14.018.8

電磁攪拌による SUS 430 連铸スラブの凝固組織改善

伊藤 幸良*・岡島 忠治*・前出 弘文*・田代 清*

Refining of Solidification Structures of Continuously Cast Type 430
Stainless Steel Slabs by Electromagnetic Stirring

Yukiyoshi ITOH, Tadaharu OKAJIMA, Hirobumi MAEDE, and Kiyoshi TASHIRO

Synopsis:

By preliminary tests for small ingots of Type 430 steel, the effect of electromagnetic stirring on refining of solidification structure was confirmed.

A pair of linear-motor type stirrers was set in the slab caster and conditions of stirring and temperature of liquid steel in tundish for refining of solidification structure were investigated. By electromagnetic stirring of such a mode that directions of the two stirrers are same and are reversed every ten seconds, and by controlling the superheat of liquid steel in 15 to 25°C, equiaxed structure more than 50% in thickness of slab is secured and the ridging of cold sheet is improved.

1. 緒 言

クロム系ステンレス鋼を連続铸造法によつて铸造する場合、強固な柱状晶が発達しやすく、これが最終製品の材質へ悪影響をおよぼすことが知られている。とりわけ、深絞り用低炭素 17%クロムステンレス鋼 (SUS 430 鋼) では鑄片の柱状晶が冷延鋼板のバンド組織として残り、深絞り加工時にリジングと呼ばれる表面欠陥が発生する¹⁾²⁾。したがつて、SUS 430 鋼を連铸法で製造するためには、凝固組織の微細化が必要であり従来から種々の対策が試みられている³⁾⁴⁾。著者らも SUS 430 鋼の凝固組織改善について一連の研究をおこない、前報⁵⁾⁶⁾において合金添加法、接種法および振動铸造法について報告した。これらの方法は SUS 430 鋼の凝固組織微細化に有効であることは確認できたが、製品材質への影響があつたり、連铸の条件下での適用に限界があり、連铸法に適した方策が望まれた。そこで、電磁攪拌方法に着目し実験室における小鋼塊を対象とした基礎実験を重ね、SUS 430 鋼の凝固組織改善の効果を確認した。さらに、連铸実機に本格的な電磁攪拌装置を設置し、SUS 430 鋼冷延鋼板のリジング対策として十分な等軸晶化の条件を見出し、連続铸造法による SUS 430 鋼の製造を可能にした。

2. 小鋼塊による基礎実験

2.1 実験方法

基礎実験としてははじめに 300 kg 電気炉で SUS 430 鋼を溶製し、70 kg 丸型鋼塊 2 本立てで注入し、一方を比較鋼塊、他方を電磁攪拌試験鋼塊とした。電磁攪拌装置としては 7.5 kW、3 相 4 極の誘導電動機のスターターを使用し、電源は 50 Hz、AC 200 V である。Fig. 1 に実験方法の概要を示した。鑄型は内径 155 mm、肉厚 4 mm の非磁性の SUS 304 鋼製パイプを使用し、スターターと鑄型間を水冷銅パイプで熱遮蔽した。実験は 6 ヒートおこない、Table 1 に示すように攪拌時期と電流を

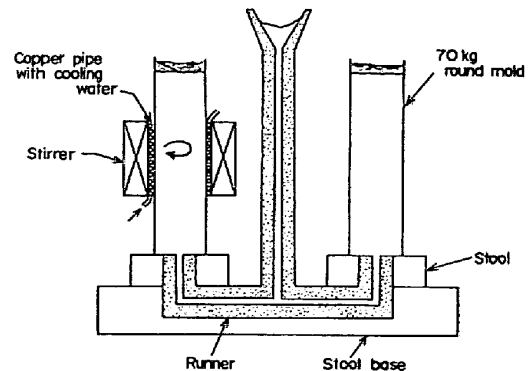


Fig. 1. Experimental method of electromagnetic stirring for 70 kg round ingots.

昭和 51 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 5 月 20 日受付 (Received May 20, 1980)

* 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

Table 1. Experimental condition of electromagnetic stirring for 70 kg round ingots.

Experiment No.	Start of stirring	Duration of stirring (min)	Stirring power (A)	Superheat in mold (°C)
R 1	15 s. after teeming end	5	112-120	n. d.
R 2	15 s. after teeming end	4	122-132	n. d.
R 3	Start of teeming	1	150	50
R 4	Start of teeming	3	100	40
R 5	1 min. after teeming end	2	100	40
R 6	2 min. after teeming end	2	100	n. d.

Table 2. Experimental condition of electromagnetic stirring for 300 kg rectangular ingots.

Experiment No.	Stirring mode in Fig. 3	Start of stirring	Duration of stirring (min.)	Stirring power (A)	Superheat in mold (°C)
S 1	Without stirring				50
S 2	Without stirring				35
S 3	Type A	Start of teeming	1	124	47
S 4	Type A	Start of teeming	1	100	n. d.
S 5	Type A	2 min. after teeming end	1	100	n. d.
S 6	Type A	3 min. after teeming end	1	100	n. d.
S 7	Type A	Start of teeming	0.5	101	52
S 8	Type A	Start of teeming	0.8	100	52
S 9	Type A	Start of teeming	3	100	50
S 10	Type C	Start of teeming	3	178	50
S 11	Type D	Start of teeming	1	134	37
S 12	Type D	Start of teeming	3	175	50
S 13	Type C	Start of teeming	1	150	35
S 14	Type D	2 min. after teeming end	1	264	n. d.

変動させた。一部の実験では比較鋼塊の底部に熱電対を埋め込み、鑄型内溶鋼の過熱度を測定した。攪拌方法は一方連続としたため、溶鋼流動は平面内環流となりいずれの攪拌鋼塊においても、鑄型内湯面で回転流が観察された。

丸型鋼塊の実験により電磁攪拌法の顕著な凝固組織微細化効果を認めたが、スラブ連铸機へ適用する場合、攪拌方式が問題となる。そのため 300 kg 扁平鋼塊を対象として攪拌方式の試験をおこなった。電磁攪拌装置として 50 Hz, 7.5 kW, AC 200 A, 3 相 4 極, スロット数

60, コイル巻数 10, 線径 1.6 mmφ のリニアーマーターを製作した。実験方法は Fig. 2 に示すとおりで、鑄型は板厚 10 mm の SUS 304 厚鋼板製 510 mm (幅) × 220 mm (厚) × 350 mm (高) で、鑄型とリニアーマーター間に水冷銅パイプを配置した。攪拌方式の検討のために、Fig. 3 に示すようにリニアーマーターの配列、攪拌方向を変動させた。実験条件は Table 2 に示すとおりで、この実験においても一部の鋼塊に熱電対を埋め込み溶鋼過熱度を測定した。

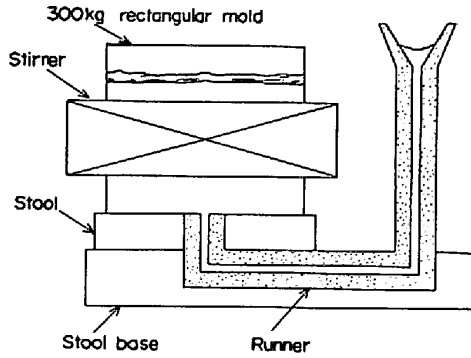


Fig. 2. Experimental method of electromagnetic stirring for 300 kg rectangular ingots.

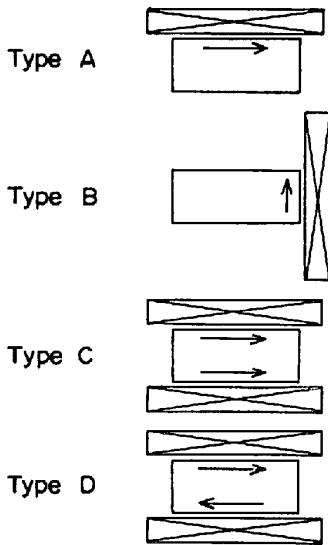


Fig. 3. Stirring mode for 300 kg rectangular ingots.

2.2 実験結果および考察

70 kg 丸型鋼塊の縦断面および横断面についてマクロ腐蝕をおこない、電磁攪拌の凝固組織への影響を観察した。いずれの実験においても比較鋼塊では鋼塊底部を除き中心まで柱状晶が発達しているのに対し、電磁攪拌鋼塊では表層に柱状晶がみられるが、鋼塊内部は極めて微細な等軸晶組織になっており、攪拌時間、攪拌電流に関係なく十分な等軸晶化が進行している。電磁攪拌時間のもつとも短い試験 R 3 の鋼塊のマクロ組織を Photo. 1 に示す。このように電磁攪拌による凝固組織改善効果は顕著であるが、注入と同時に攪拌を開始した鋼塊においても表層にある程度の柱状晶が形成されており、溶鋼の過熱度が何らかの関与をしていることが推定される⁶⁾。ちなみに、攪拌鋼塊の柱状晶長さを電磁攪拌開始時間との関係で図示すると Fig. 4 のとおりである。

300 kg 扁平鋼塊については縦断面のマクロ腐蝕をおこない凝固組織を観察した。比較鋼塊と電磁攪拌鋼塊のマクロ組織の代表例を Photo. 2 に示したが、扁平鋼塊においても電磁攪拌による凝固組織改善効果は明瞭であ

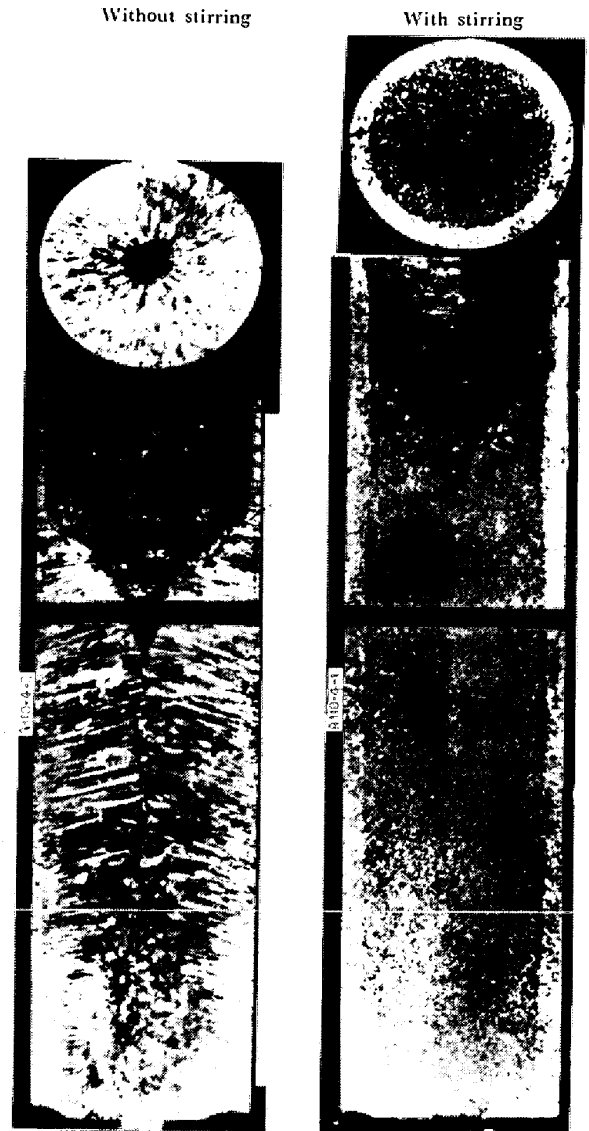


Photo. 1. Macrostructures of 70 kg round ingots (R 3).

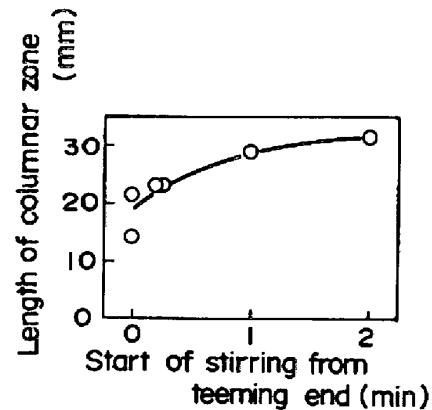


Fig. 4. Length of columnar zone 70 kg round ingots.

る。電磁攪拌条件と組織改善効果との関係を明らかにするため、縦断面における等軸晶帯の面積率を測定し Fig. 5 に示した。等軸晶率は電磁攪拌開始時期とよく対応

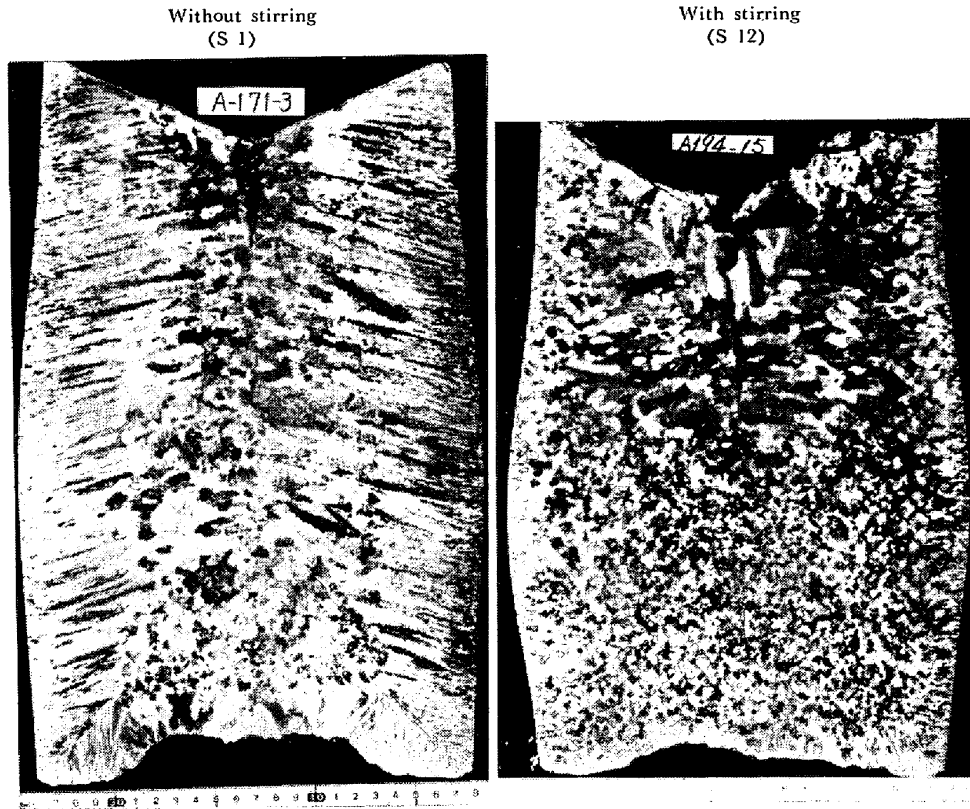


Photo. 2. Macrostructures of 300 kg rectangular ingots.

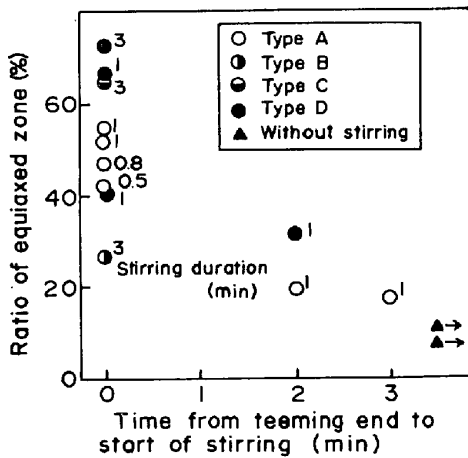


Fig. 5. Ratio of equiaxed zone of 300 kg rectangular ingots.

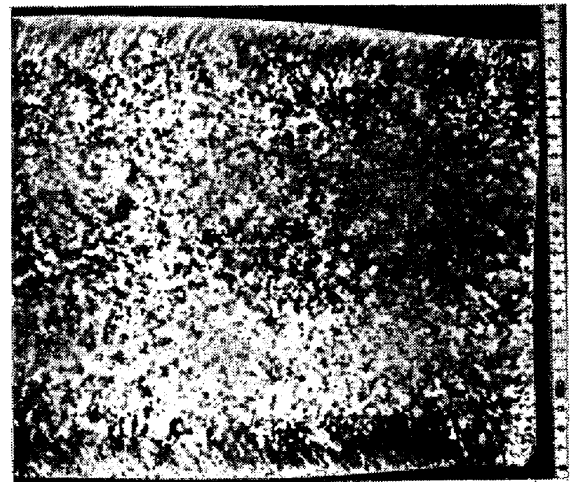


Photo. 3. Macrostructure of cross section of SiO ingot.

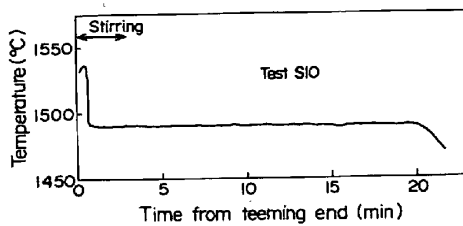


Fig. 6. Temperature of steel in 300 kg mold.

し、注入終了と同時に攪拌を開始した鋼塊の等軸晶率をもっとも大きい。攪拌モードの影響については長辺側片面にリニアモーターを配置した Type A で大幅な凝

固組織改善効果がみられ、長辺側両面にリニアモーターを配置した Type C および D では効果がさらに増大している。一方、短辺側片面を攪拌した Type B では組織改善効果は極めて小さい。攪拌時間の影響についてはそれぞれの攪拌モードにおいて、攪拌時間が長いほど等軸晶率が増加する傾向が認められる。

Photo. 2 のマクロ組織にみられるように、扁平鋼塊においても注入終了と同時に電磁攪拌を開始した鋼塊でも、表層に柱状晶の形成が認められる。電磁攪拌による

等軸晶化の開始は鑄型内溶鋼温度と関連すると推定されたので、一部の鋼塊については鑄型内に熱電対を埋め込み、溶鋼温度と凝固組織の関係を求めた。一例として試験 S10 についての結果を Fig. 6 および Photo. 3 に示した。鑄型内溶鋼の過熱度は 50°C であつたが注入終了後 0.7 min で過熱度が解消している。一方、鋼塊横断面のマクロ組織によると柱状晶厚は 22 mm であり、別に測定した凝固速度係数 $K=26\text{ (mm}\cdot\text{min}^{-1/2})$ を用いて計算すると柱状晶の凝固時間は 0.72 min となり、等軸晶化開始点は溶鋼過熱が解消する時期と完全に一致している。すなわち、電磁攪拌による等軸晶化のためには、鑄型内未凝固溶鋼の過熱を早期に解消することも重要である。

以上の小鋼塊を対象とした基礎実験によつて、電磁攪拌の SUS 430 鋼の凝固組織改善効果が確認された。一般に、電磁攪拌による等軸晶化のためには、

- (1) 十分な量の結晶核の形成
- (2) 結晶核が安定に生き残るための溶鋼温度条件が必要であると考えられる。

結晶核は溶鋼流動によつて凝固界面の結晶先端が溶断されて形成すると推定される。ちなみに、上記の実験における溶鋼平均の攪拌推力 (溶鋼が受ける圧: mmFe) および溶鋼流速を攪拌条件から計算すると、丸型鋼塊で攪拌電流 100 A の場合 3.0 mmFe および 24 cm/s 、扁平鋼塊で試験 S 12 の場合 4.2 mmFe および 29 cm/s である。

大野らは鋼塊の等軸晶化のための結晶核の形成はメニスカスにおいて起りやすいと報告している⁷⁾。しかし、電磁攪拌装置を連鑄機のメニスカス近傍に設置した場合、連鑄パウダー巻き込みの問題が懸念される。上述の

基礎実験では電磁攪拌によつて、等軸晶化のための結晶核がどの位置で形成したかは明らかにできない。そのため、メニスカスでの結晶核形成の影響を分離すべく Photo. 4 に示すような実験をおこなつた。すなわち、 70 kg 丸型鑄型の高さ中央に鋼板製の隔板を設け、鑄型壁より 25 mm の位置に $10\text{ mm}\phi$ の穴を設け、SUS 430 鋼を下注ぎし注入終了後電磁攪拌を適用した。鋼塊縦断面のマクロ組織から明らかなように、鋼塊の隔板より下部においても上部と同様に微細な等軸晶が形成されている。このことは溶鋼流動による結晶核形成がメニスカスのみならず、凝固界面の柱状晶先端においても起こることを示していると考えられる。

3. スラブ連鑄機への電磁攪拌の適用

3.1 電磁攪拌装置

前章の小鋼塊を対象とした基礎実験によつて、SUS 430 鋼凝固組織改善に対する電磁攪拌の有効性が確認され、その場合攪拌推力は $3\sim 4\text{ mmFe}$ で十分であつた。しかし、スラブ連鑄機の場合常に湯面へ新しい溶鋼が連続的に供給されるため、温度条件が小鋼塊より厳しいこと、鑄片の扁平比が大きく溶鋼流動速度の損失のあることなどを考慮することが必要である。

室蘭製鉄所の垂直型スラブ連鑄機に電磁攪拌装置を設置するに当たり、上述の点を配慮し、さらに SUS 430 鋼のリジング改善の観点から目標等軸晶率を約 50% とし、Fig. 7 に示すようにスラブ長辺面両側に一対のリニアモーター型の攪拌装置を配置した。位置は鑄型上端から約 2.4 m の二次冷却帯であり、電磁攪拌装置本体および近傍のロールなどは攪拌推力低下を抑えるために非磁性体とした。最大電流を流した場合のスラブ中心推力を真鍮板懸垂方式で測定した結果、 145 mm 厚スラブで約 92 mmFe 、 215 mm 厚スラブで約 46 mmFe である。

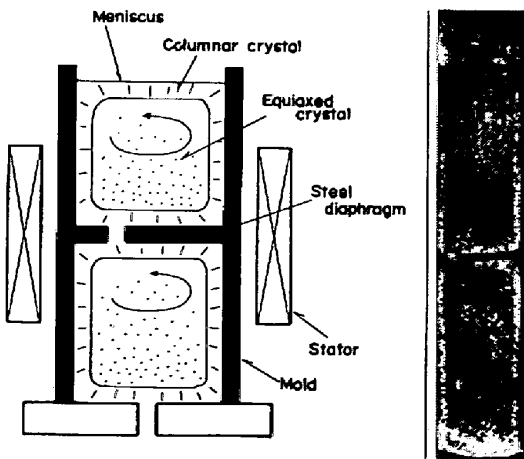


Photo. 4. Experiment for proving the sites of free crystals formation by electromagnetic stirring.

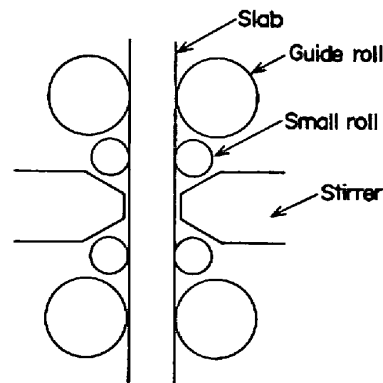


Fig. 7. Electromagnetic stirrers in continuous casting machine.

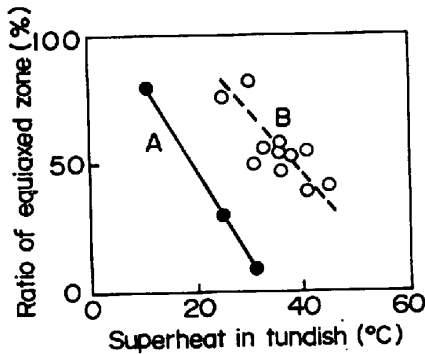
3.2. SUS 430 鋼の凝固組織改善

はじめに電磁攪拌パターンの影響を明らかにするため、スラブ両面に配置した攪拌装置の推力発生方向を逆向きにした場合 (Type A) および同一方向にしかつ 10 s ごとにその方向を変更させた場合 (Type B) について試験した。145 mm 厚スラブについての試験結果は Fig. 8 に示すとおりで、Type B の方が明らかに組織改善効果大きい。ここで等軸晶率はスラブ横断面における厚さ方向の等軸晶帯の率で表示した、本電磁攪拌装置を用い低融点合金を対象とした流動実験によると、Type A の攪拌では金属は平面内環流となるが、スラブ厚が小さい場合流速損失が大きい。一方、Type B の攪拌では金属は推力方向に流れ短辺に当たって上下方向に流れを変え、全体として上下方向に広い攪拌域が形成される。Type B の攪拌において推力方向の変更間隔が長

い方が攪拌力は大きい、長すぎるとスラブ幅方向で等軸晶率に差が生じる。10~20 s 間隔で推力方向を変更するのが適当である。

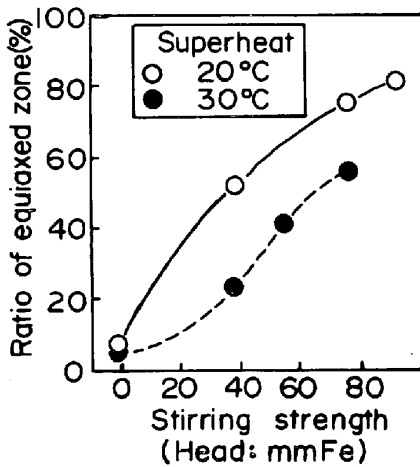
攪拌力と等軸晶率の関係は Fig. 9 に示すとおりで、比較的弱い攪拌で等軸晶化が進行し、その後攪拌力の上昇とともに徐々に等軸晶率が增大している。溶鋼過熱度 20°C の場合の SUS 430 鋼スラブ横断面のマクロ組織を Photo. 5 に示したが、攪拌力の上昇とともに等軸晶率が増加し、かつ等軸晶粒が細かくなっている、攪拌強度が大きい場合には、電磁攪拌機より上部で等軸晶化が開始しているが、これは流動が攪拌機より上方までおよぶためである。

攪拌推力 76 mmFe で铸造した 145 mm 厚スラブおよ



A : Directions of two stirrers are opposed.
B : Directions of two stirrers are same and are reversed reciprocally.

Fig. 8. Effect of stirring pattern on refining of solidification structure.



Stirring mode

Directions of two stirrers are same and are reversed every ten seconds.

Fig. 9. Effect of stirring strength on ratio of equiaxed zone of continuously cast slab.

Without stirring



With stirring (19mmFe)



With stirring (38mmFe)



With stirring (46mmFe)

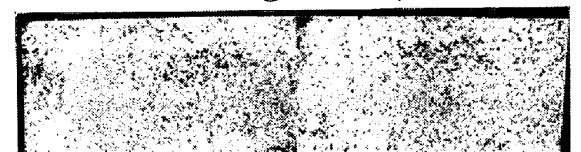


Photo. 5. Macrostructures of continuously cast Type 430 steel slabs. (X1/9.5)

び電磁攪拌をおこなわない 145 mm 厚スラブの等軸晶率と溶鋼過熱度との関係を Fig. 10 に示した。電磁攪拌なしの場合でも溶鋼過熱度が 15°C 以下で電磁攪拌材並の等軸晶率が得られているが、15°C 以上の過熱度において電磁攪拌の効果が明瞭に現れている。目標等軸晶率 50%とした場合、溶鋼過熱度を 25°C 以下に抑えるとほぼ完全に目標を達成する。溶鋼過熱度は小さいほど等軸化には有利であるが、小さすぎた場合非金属介在物性の欠陥が増大するため、その下限は 15°C に規制すべきで

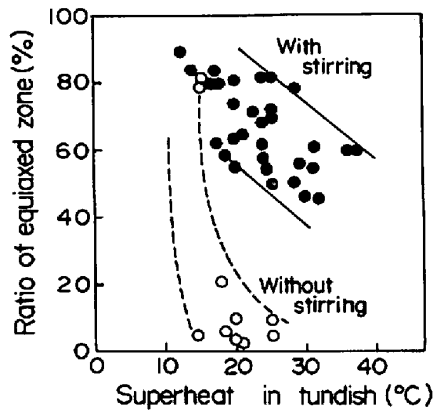


Fig. 10. Effect of superheat on equiaxed zone ratio of continuously cast slab.

あり、結局、電磁攪拌による連铸 SUS 430 鋼の等軸晶化のためには、タンデッシュ溶鋼過熱度を 15~25°C に管理することが必要である。

電磁攪拌による凝固組織微細化の感受性は鋼種によって異なることが推定される。本電磁攪拌装置は特殊帯鋼用の高炭素鋼スラブの中心偏析対策としても使用されているので、215 mm 厚スラブについて同一電磁攪拌条件下で铸造した S 45 C 鋼と SUS 430 鋼の等軸晶率を比較した。結果は Fig. 11 のとおりで過熱度が大きい範囲で明らかに S 45 C 鋼の方が等軸晶化が進行しやすい。竹内らもブルーム連铸における電磁攪拌の試験で、SUS 430 鋼はオーステナイト系ステンレス鋼より等軸晶化が進行しにくいことを認めている⁴⁾。

SUS 430 鋼が組織微細化しにくいことは凝固形態と関連していると推定される。一般に SUS 410 鋼, SUS 430 鋼のような低炭素フェライト系ステンレス鋼は凝固温度範囲が狭く、デンドライト凝固が進みにくいと考

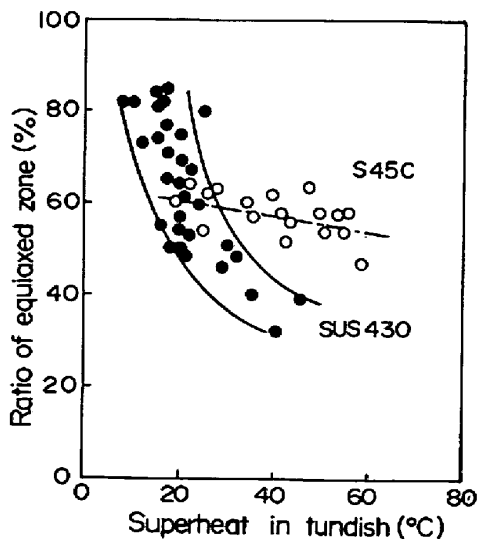


Fig. 11. Effect of steel grade on refining of solidification structure by stirring.

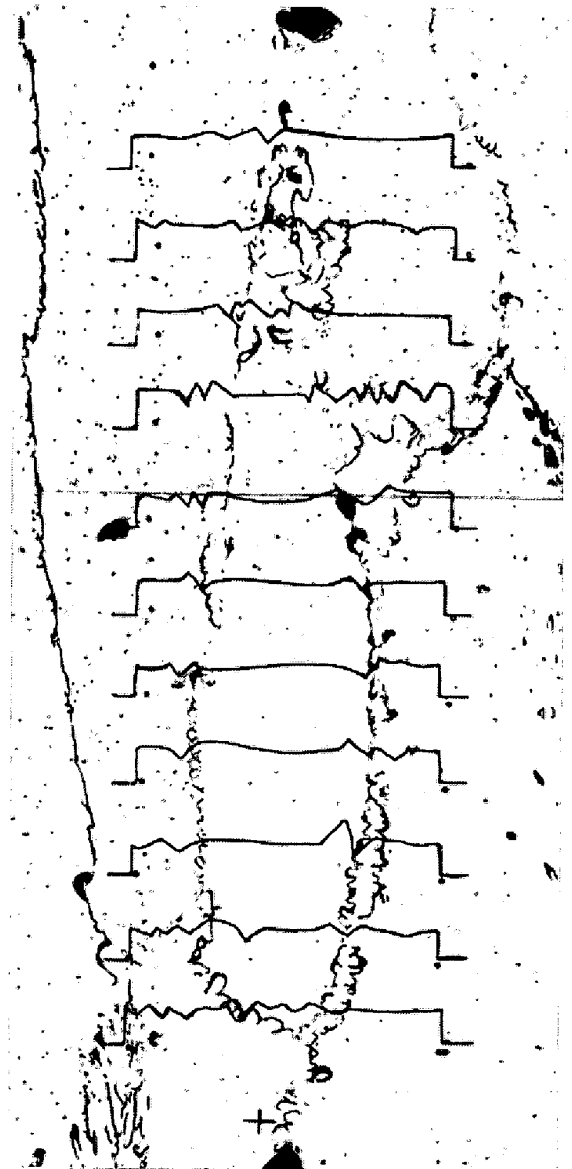


Photo. 6. Microstructure of columnar crystals of Type 430 steel and distribution of P near them. (X 105)

られる。従来から多くの試みにもかかわらず SUS 410 鋼, SUS 430 鋼のデンドライト組織を顕出した例はほとんどなく、わずかに、新妻ら⁹⁾が ³⁵S を添加した SUS 430 鋼についてオートラジオグラフィを用い、微量の S を検出することによりデンドライトを確認したと報告している。

著者らは実験室的に溶製した SUS 430 鋼小鋼塊の柱状晶について、各種腐蝕法による組織観察および EPMA による P の分布を調べ Photo. 6 のような結果を得た。柱状晶の境界では随所にデンドライトが認められるが、柱状晶の内部にはデンドライトが全く観察されず、P の線分析によっても柱状晶境界ではデンドライトに対応するように P の濃淡パターンが認められるが、柱状晶内

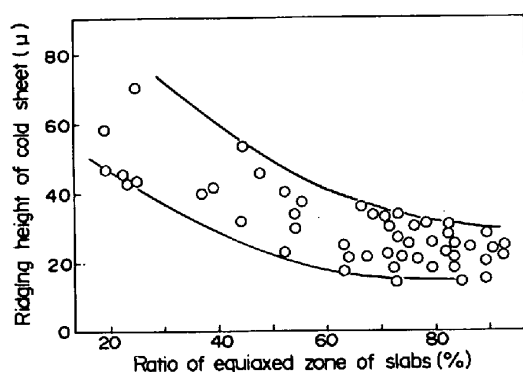


Fig. 12. Relation between ridging of cold sheet and equiaxed zone ratio of slab.

はPは均一に分布している。SUS 430 鋼では柱状晶境界ではある程度の溶質成分の濃縮がありデンドライトが形成されるが、柱状晶内部ではデンドライトが形成されないと推定される。したがって、SUS 430 鋼が電磁攪拌によつて微細化しにくいのは、凝固界面において溶鋼流動によつて溶断されるデンドライトが少ないためである。

しかし、小鋼塊およびスラブ連铸機での電磁攪拌実験により、適当な攪拌強度を与え十分な量の結晶核を形成し、かつ溶鋼温度条件を管理することによつて SUS 430 鋼の凝固組織微細化が達成することが確認された。

連铸法で製造された SUS 430 鋼スラブを 3.0 mm 厚のホットコイルに熱延、850°C-4 hs の粗焼なまし後、試験用冷延機で厚さ 1.3 mm の冷延鋼板に圧延し、820°C-10 min の中間焼なましを経て 0.5 mm まで冷延した。続いて 820°C-10 min の仕上げ焼なまし処理後 L 方向 20% 引張試験によつてリジングを評価した。結果は Fig. 12 に示すとおりで、スラブの等軸晶率とリジングの間には明瞭な相関が認められ、50%以上の等軸晶を確保すればリジング高さは 50 μ 以下で、造塊材と同等ないしそれ以上のリジング性が得られる。

現在、室蘭製鉄所においてはスラブ連铸機に電磁攪拌

装置を実用化し、深絞り加工用冷延鋼板向けの SUS 430 鋼を順調に製造している。

4. 結 論

SUS 430 鋼の連铸化を目的に、電磁攪拌による凝固組織改善について実験をおこなつた。

はじめに、70 kg 丸型および 300 kg 扁平型小鋼塊を対象に基礎実験をおこない、SUS 430 鋼の凝固組織微細化に電磁攪拌が有効であることを確認した。電磁攪拌による等軸晶化のためには(1)十分な量の結晶核の形成および(2)結晶核が安定に生き残るための溶鋼温度条件が必要であることも明らかとなつた。

続いて、スラブ連铸機にリニアモーター型の攪拌装置一対を設置し、等軸晶組織を得るための攪拌条件および溶鋼温度条件の検討をおこなつた。攪拌装置の推力発生方向を同一とし、10 s ごとにその方向を変更させ、溶鋼過熱度を 15~25°C に管理することにより、50%以上の等軸晶率が確保でき、その結果冷延鋼板のリジング性は造塊材と同等ないしそれ以上に改善された。

文 献

- 1) 大橋延夫: 日本金属学会誌, 31 (1967) 4, p. 519
- 2) 武智 弘, 加藤 弘, 角南達也, 中山 正: 日本金属学会誌, 31 (1967) 6, p. 717
- 3) 漆山信夫, 大岡耕之, 竹内英麿, 池原康允, 若松道生: 鉄と鋼, 60 (1974) 4, S 112
- 4) 竹内英麿, 池原康允, 柳井隆司, 松村省吾: 鉄と鋼, 63 (1977) 8, p. 1287
- 5) 伊藤幸良, 高尾滋良, 岡島忠治, 田代 清: 鉄と鋼, 66 (1980) 6, p. 710
- 6) 伊藤幸良, 岡島忠治, 田代 清: 鉄と鋼, 66 (1980) 8, p. 1093
- 7) A. OHNO and T. MOTEGI: AFS Cast Metals Research Journal, (1975) 6, p. 45
- 8) 新妻主計, 郡司好喜: 鉄と鋼, 65 (1979) 9, p. 1457