

高Si鋼・連続铸造スラブの凝固組織におよぼす電磁攪拌の影響

Effects of Electromagnetic Stirring on Solidification Structure of Continuously Cast High Silicon Steel Slabs

新日本製鉄(株)八幡製鉄所(現:光製鉄所)
八幡製鉄所沖森麻佑巳*
土田宗広・稲岡数磨

緒言

連続铸造片で製造した高合金含有薄鋼板に発生するリジング(皸模様)の高低の原因は铸造片の柱状晶組織であり、凝固組織を等軸晶化することで解決される。高Cr鋼(SUS430)では等軸晶率が50%以上あればリジングが改善される¹⁾。高Si(~2%)鋼では、垂直式連続铸造機の低速(0.65m/min, 250mm厚み)铸造で铸型より3.4mにある電磁攪拌(以下EMS)を適用して、等軸晶率 ϵ_0 (定義は後述2.2参照)が60%以上(図1)あればリジングは発生しない(後述図5参照)。一方、湾曲式連続铸造機の高速(1.0~1.2m/min)铸造では上記の関係が不明確であったのでEMSを適用した場合の凝固組織とリジングに関する調査を実施した。

2. 試験条件と等軸晶率評価方法

2.1 試験条件

連続铸造の試験条件を表1に示す。

Tab.1 Continuous casting condition

- | |
|---|
| 1. Bending radius = 10.5 m |
| 2. Slab thickness = 250mm |
| 3. Casting speed = 1 ~ 1.2 m/min |
| 4. Superheat = 5 ~ 55°C |
| 5. Position of EMS from meniscus
Upper = 4.1m, Lower = 10.3m |
| 6. Secondary cooling (l/kg)
= 2.2(soft) ~ 3.1(strong) |

なお既設EMSを活用したのでEMSの位置は後述のように等軸晶率を最大にする最適位置ではない。

2.2 等軸晶率の評価法

図2のように等軸晶率は2次柱状晶有無で評価が異なる。2次柱状晶の無い場

合は ϵ_0 である。2次柱状晶(厚み l_a)の有る場合、 E_0 はL(Loosed)面側2次柱状晶とF(Fixed)面側1次柱状晶の間の等軸晶を、 E_1 はL面側の1次と2次の柱状晶間の等軸晶を、 E_T は2次柱状晶を含んだ全等軸晶を評価する。リジング発生に影響する等軸晶厚みという点

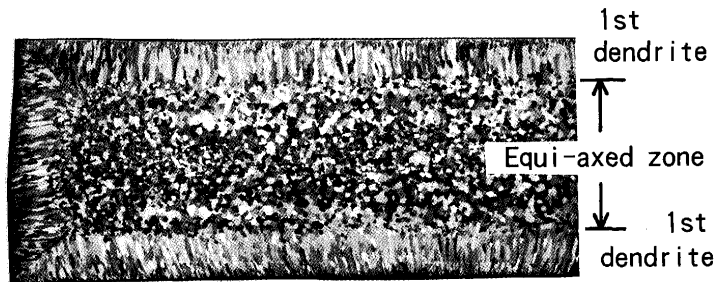


Fig.1 Solidified structure of cast slab stirred by EMS in vertical CC

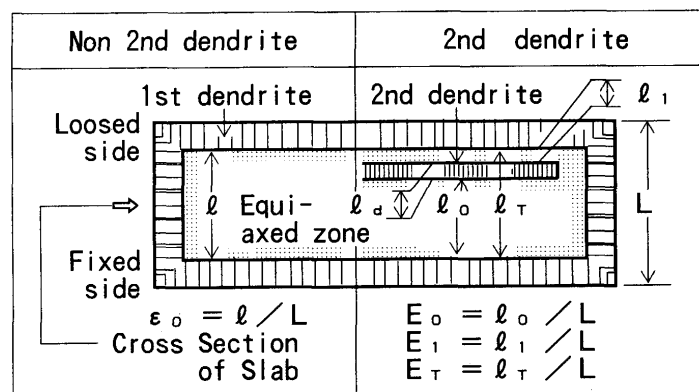


Fig. 2 Evaluation of equi-axed zone

から「2次柱状晶無しのε₀。」と対応するのは「2次柱状晶有りのE₀。」である。また2次柱状晶率はD = l₀ / Lである。

3. 試験結果

3・1 EMS適用時の凝固組織

(1) 上部EMS適用

図3に上部EMSを適用した場合のスラブC(Cross)断面のマクロ写真を示す。スラブL面側では表層から成長した1次柱状晶は一旦等軸晶化しているが、その後再び2次柱状晶化している。F面側は表層から1次柱状晶が出た後、L面側等軸晶がF面側に沈降し、等軸晶が中心まで出現している。ε₀と対応する今回のE₀は30%である



Fig.3 Solidified structure of cast slab stirred by upper EMS in bending CC

(2) (上部+下部) EMS適用

図4に上部と下部のEMSを適用した場合のマクロ写真を示す。スラブL面の1次柱状晶が上部EMSで一旦等軸晶化した後2次柱状晶ができるが、その後下部EMSで再び等軸晶が生成しておりE₀は47%である。

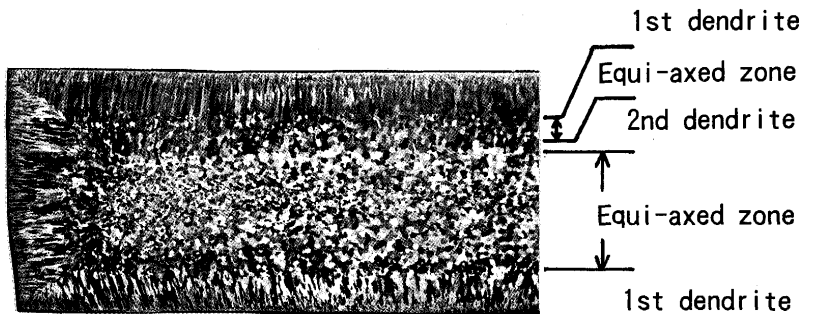


Fig.4 Solidified structure of cast slab stirred by upper and lower EMS in bending CC

3・2 等軸晶率とリジングの関係

等軸晶率とリジングの関係について、I = (垂直式CC+低速鑄造)とII = (湾曲式CC+高速鑄造)を比較すると図5となる。前述のようにε₀ ≥ 60%でリジングが発生しないIに対し、IIで上部と下部のEMSを使用した場合(凝固組織は図4に対応)にはE₀が40~60%(図中M)でもリジング評点が合格となっている。これはL面側で等軸晶に挟まれた2次柱状晶がその率D = (l₀ / L) < 20%であればリジングが発生しないことを示し、等軸晶率で表現すると(E₀ + E₁) > 40%となる。当理由を後に検討する。

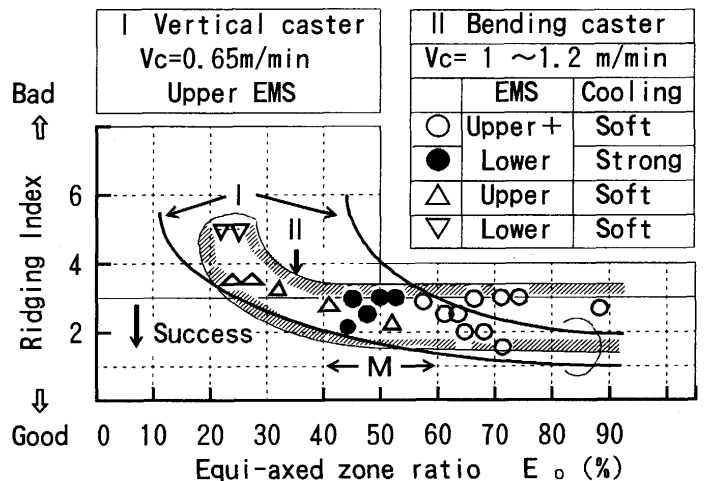


Fig.5 Relationship between Equi-axed zone ratio and ridging index

3・3 操業条件と等軸晶率の関係

(1) タンディッシュ内溶鋼スーパーヒート(過熱度)

図6はタンディッシュスーパーヒートΔTと上述のリジング発生を評価する(E₀ + E₁)の関係である。上部EMS適用の場合は、ΔTが高くなると等軸晶率は40%以下まで低下し、(上部+下部)EMS適用ではΔTに等軸晶率は影響されず50~60%が得られている。

(2) 2次冷却条件の影響

図6の(上部+下部)EMS適用時で連鑄2次冷却が強冷却になると等軸晶生成が減少して

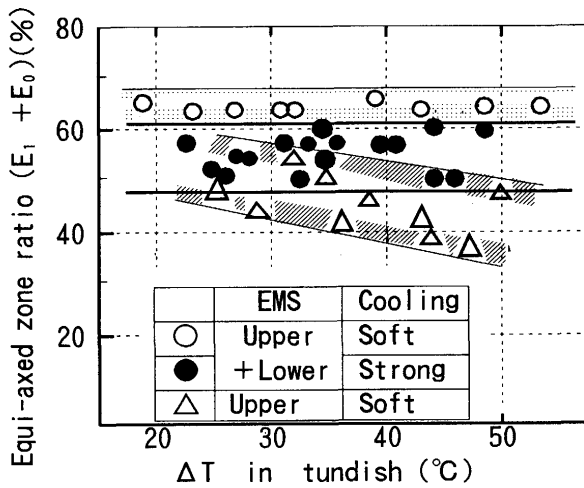


Fig. 6 Relationship between TD ΔT and equi-axed zone ratio

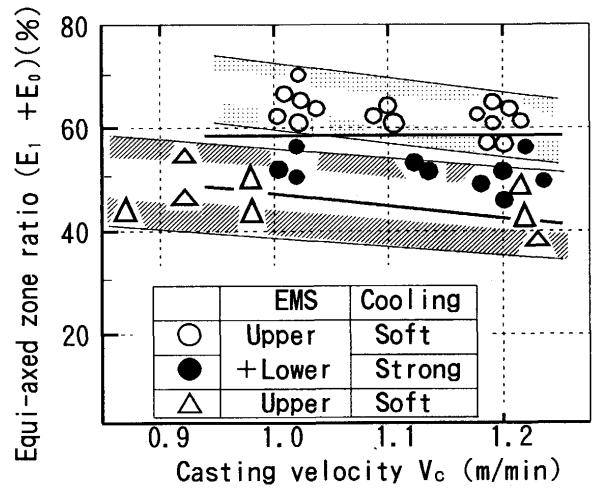


Fig. 7 Relationship between casting velocity and equi-axed zone ratio

いる。当理由についても後に考察する。

(3) 鑄造速度の影響

図7に示すように、EMS条件によらず、鑄造速度が速くなると溶鋼がEMSの影響域を通過する時間が短くなるために、等軸晶率はわずかに低下している。

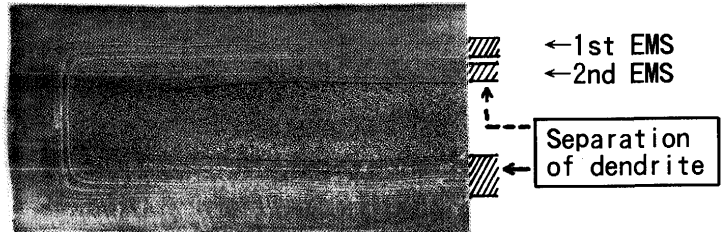


Fig. 8 Separation of dendrite stirred by upper and lower EMS

4. 考察

4. 1 2次柱状晶有りでも

リジング評点の良好な理由

(1) EMSによる柱状晶の分断微細化

鑄片の凝固組織の詳細観測にエッチプリント法(腐食液=ピクリン酸+塩化第二銅)を採用した。図8は図4の2次柱状晶が出現した場合のプリントである。L面表層から発達した1次柱状晶が上段EMSにより連続して分断され微細化し、その後は若干の2次柱状晶が出現するが再度下段EMSで分断され微細化し、後は等軸晶が発生していることが読み取れる。

(2) 熱間圧延による柱状晶の微細化

連鑄片(厚み250mm)を熱間圧延した時の圧下力による鑄片結晶粒の厚み方向の微細化深さを調査した。図9は図4のように2次柱状晶のある場合でリジングの発生しなかった熱延板断面組織を示している。表層から厚み方向20%まで微細化された組織が見られ、圧下力が及んでいることがわかる。上記(1)と(2)から、表層から厚み方向で20%にある1次柱状晶は熱間圧延より微細化され、2次柱状晶は熱間圧延により微細化されないが全厚みに対する率 $D(l_0/L)$ が20%以下と小さい(前述3.2参照)ためにリジングが発生しないと考えられる。

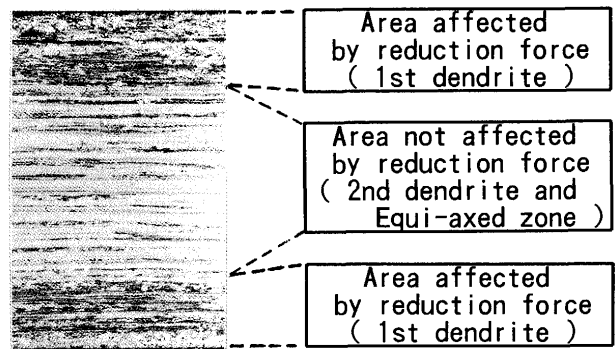


Fig. 9 Destruction of dendrite by reduction force in hot rolling

4. 2 上部+下部EMSで等軸晶率がTD ΔT に依存しない理由

図6の $(E_0 + E_1)$ を E_0 と E_1 に分解すると図10となる。上部EMSだけでは E_0 に

相当する部分まで攪拌が及ばず等軸晶の発生が $T D \Delta T$ に依存するが、(上部+下部) EMS では E_0 。相当部にも攪拌が及び溶鋼温度が均一化され $T D \Delta T$ に依存しなくなる。EMS 設置位置と図 8 の EMS による攪拌影響部や 2 次柱状晶発生部から EMS の攪拌到達域を求めると

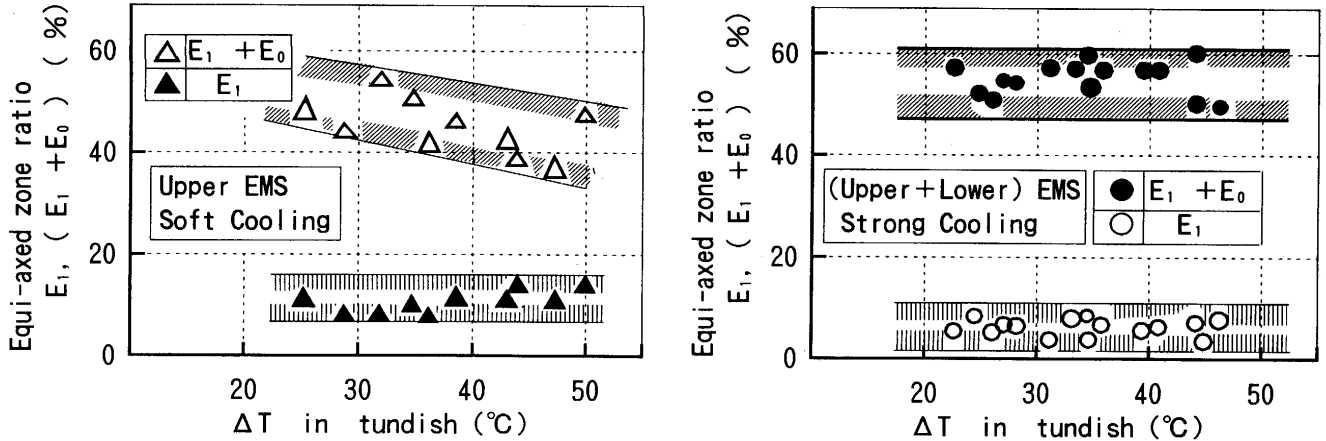


Fig.10 Relationship between ΔT in TD and equi-axed zone ratio (%)

図 11 となる。上部 EMS では 2.5m~6m が攪拌され等軸晶が生成し、その後攪拌の及ばない 7.5m まで 2 次柱状晶が出て再び下部 EMS によって等軸晶が生成されている。この結果から下部 EMS の位置を 1.5m 上方に設定すれば 2 次柱状晶の発生を抑えることが可能であると考えられる。

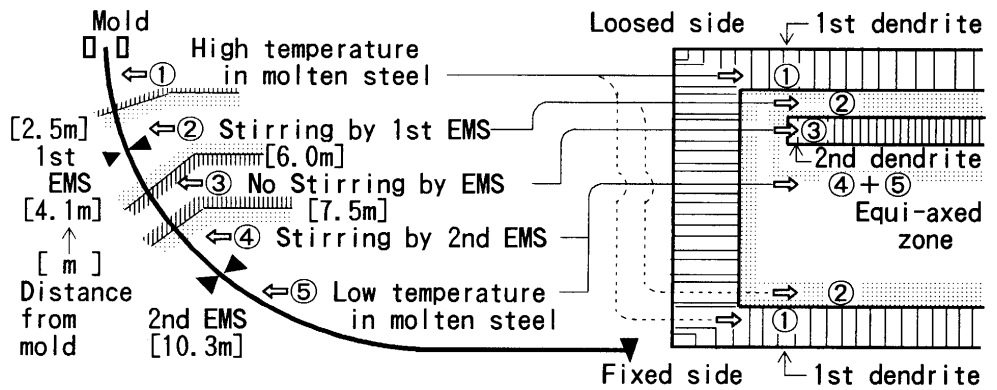


Fig.11 Relationship between stirring of EMS and equi-axed zone

4. 3 強冷却で等軸晶が減少する理由

鑄片を通過する EMS の磁束密度 B は下式①であり、溶鋼に及ぼされる攪拌推力 H は B^2 に比例する。鑄片が強磁性の場合は常磁性に比較して ρ / μ が小さく (ρ が小さく μ が大きい) B が減少し H も弱くなる。今回の冷却パターンで鑄片表面温度をシュミレーションした結果、鑄片表層部約 2 ~ 3 mm がキューリー点以下となって強磁性化しており、EMS 装置と鑄片の間に薄鉄板が挿入された場合と同様の状態が生じ H が低下し等軸晶の生成が少なくなっていたと考えられる。(式① = $B \propto \exp(-l / (\rho / \pi \mu f)^{0.5})$, ρ = 抵抗率, μ = 透磁率, l = 通過距離, f = 周波数)

5. 結言

高 Si 鋼を湾曲 CC で高速鑄造する場合に、2 次柱状晶率 D が小さく ($D = (l_0 / L) < 20\%$)、等軸晶率 ($E_0 + E_1$) $> 40\%$ であればリジングが発生しない、② 2 段 EMS の最適な配置により TD 温度に影響されずリジング発生のない等軸晶を得ることが可能である、③ 強冷却よりも緩冷却の方が等軸晶発生に有効であることが明らかとなった。

文献 1) 竹内英麿, 森久, 池原康允, 駒野忠昭, 柳井隆司, 鉄と鋼 (1980) No.6 P38~46