

# 討 9 電磁攪拌によるブルーム、ビレット連铸のマクロ偏析の改善

㈱神戸製鋼所 中央研究所 ○綾田研三 森 隆資 藤本孝彦  
 神戸製鉄所 大西稔泰  
 鉄鋼生産本部 若杉 勇

## 1. 緒 言

近年、連铸技術の進歩により、線、棒用の特殊鋼が連铸化可能となり、ビレット、ブルームの連铸機により製造されつつある。この特殊鋼の連铸化が可能となった要因の一つとして電磁攪拌技術があげられる。電磁攪拌技術は当初铸型下の二次冷却帯での攪拌から始まり<sup>1)</sup>、铸型内攪拌や組合せ攪拌へと発展し、内部品質の改善のみならず表面品質の改善に大きな効果のあることが示されてきた<sup>2)</sup>。ここでは電磁攪拌の効果の内、特に中心偏析の改善に関し、当社で開発された铸型内攪拌を含む組合せ攪拌技術を用いて得られた結果について述べる。

## 2. ブルーム連铸の中心偏析の改善

組合せ攪拌技術を開発するにあたって、神戸製鉄所の垂直型2号ブルーム連铸機の1ストランドを300×400mmのサイズに改造し、铸型内と凝固末期位置に回転磁界型攪拌装置を取付け実験を行った。铸造速度は0.45m/minであり、以下に0.6% Cのパネ鋼の結果について述べる。

Fig.1にタンディッシュ内スーパーヒートと铸片の等軸晶率の関係を示す。等軸晶率には分岐柱状晶は含まれていない。スーパーヒートが増加するほど、等軸晶率は減少し、铸型内攪拌(M攪拌)を行わない場合、約50℃のスーパーヒートで等軸晶率はゼロとなっているが、铸型内攪拌を行った場合、等軸晶率が増加し、50℃のスーパーヒートでも40%の等軸晶率が確保されている。

この等軸晶率の増加により、铸片内のキャビティとともに中心偏析も改善される。Fig.2に铸造方向に連続して切出した铸片横断面の中心より6mmφドリルで採取したサンプルのC分析の結果を示す。铸型内攪拌により、中心偏析の軸心方向のバラツキが少なくなり、中心偏析の最大値も低下している。また铸型内攪拌強度の増加とともに中心偏析のバラツキは減少するが、Fig.3に軸心の偏析をヒストグラムで示したように、強攪拌の場合でも、中心偏析の平均値はほとんど変化しない。これに対し、铸型内攪拌(弱攪拌)と凝固末期攪拌を組合せた場合(M+F攪拌)、バラツキの減少は強攪拌の場合にくらべて少ないが、中心偏析の平均値が減少し

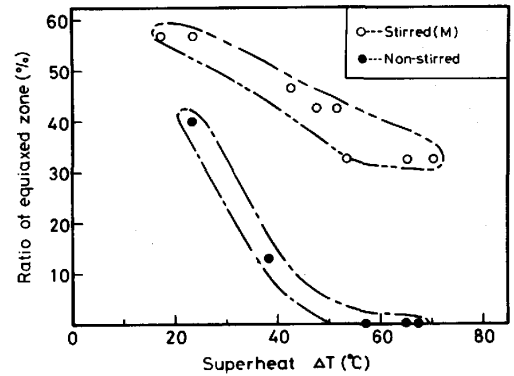


Fig.1 Relation between superheat in tundish and ratio of equiaxed zone

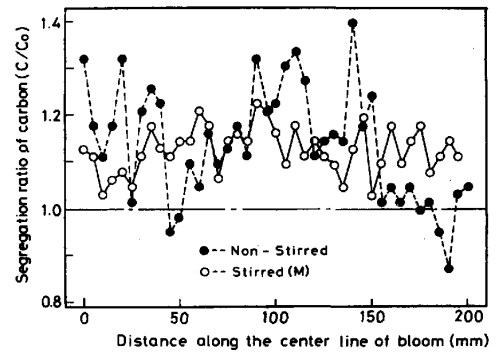


Fig.2 Comparison of center segregation of carbon between non-stirred and stirred bloom

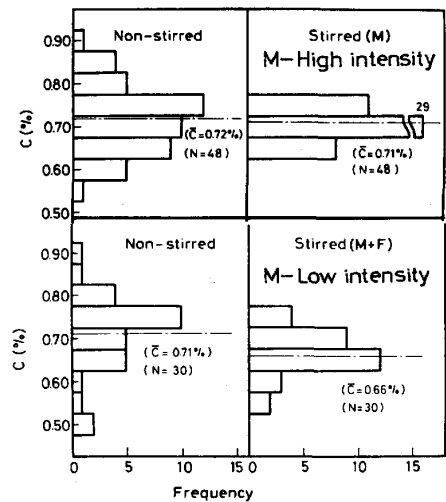


Fig.3 Comparison of histograms of center segregation of carbon between non-stirred and stirred bloom

ている。M攪拌の強度を増加すると、溶鋼流動に伴って銑片表層部に負偏析帯が強く生じる<sup>3)</sup>ようになり、製造される鋼の用途に応じて攪拌強度を調節することが必要となるため、銑型内攪拌強度を強くできない場合や、中心偏析をいっそう改善しようとする場合に、組合わせ攪拌が有効な手段となる。

2号連銑機で得られた実験結果を基にして、神戸製鉄所3号垂直曲型連銑機(300×400mm)に同様な組合わせ攪拌を採用してバネ鋼の銑造を行い、中心偏析を調査した結果をFig.4に示す。この場合、MとM+F攪拌の両方ともM攪拌の強度は弱攪拌とし攪拌効果を比較している。また、中心偏析は銑片横断面よりドリルで連続して採取したサンプルのC偏析の最大値を指数で示している。M攪拌に比較し、M+F攪拌では凝固末期攪拌により、中心偏析の平均値も低下するため、C偏析の最大値はいっそう低下し、中心偏析の改善効果が顕著となっている。

Fig.5にM+Fの組合わせ攪拌を行った場合のタンディッシュ内溶鋼のスーパーヒートと中心偏析の関係を示す。図に示されるようにCの中心偏析の平均値、最大値ともにスーパーヒートの増加とともに、増加する傾向を示しているもののスーパーヒートが約50℃以下ではほとんど影響を受けず、高温側での操業を可能としている。

つぎにこのようにして銑造されたバネ鋼を伸線加工した場合のカッピー破断テストの結果について述べる。Fig.6に300×400mmのブルームより11.5mmφに圧延されたものを通常の伸線加工より厳しい条件のもとで伸線し、カッピー破断により伸線が不可能となった限界をそれぞれの攪拌条件別に示す。中心偏析の結果と対応して、中心偏析の最も少ないM+F攪拌の場合に最も伸線限界が増加しており、銑片の中心偏析が、製品の特性として現われていることを示している。また、Fig.7にこのような伸線限界と11.5mmφロッドの中心偏析評点との関係を示す。ロッドの中心部の偏析が増加するほど伸線限界が低下し、カッピー破断の防止には中心偏析の低減が不可欠であることを示している。

3. ビレット連銑の中心偏析の改善

大断面ブルーム連銑機で得られた結果をもとに、銑型内攪拌を含む組合わせ攪拌を小断面のビレット連銑機に適用した結果について述べる。

ビレット連銑機は125mm<sup>□</sup>の曲型連銑機で2ストランドの片方のストランドの銑型内と銑型下の二次冷却帯と凝固末期部の3ヶ所にそれぞれ回転磁界型攪拌装置を取付けM+S+F攪拌として実験を行った。引抜速度は約2.5m/minで0.12% C~0.51% Cの炭素鋼に

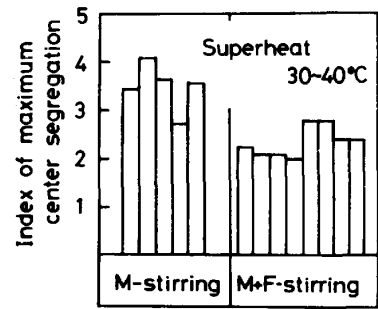


Fig.4 Effect of stirring on the center segregation of bloom

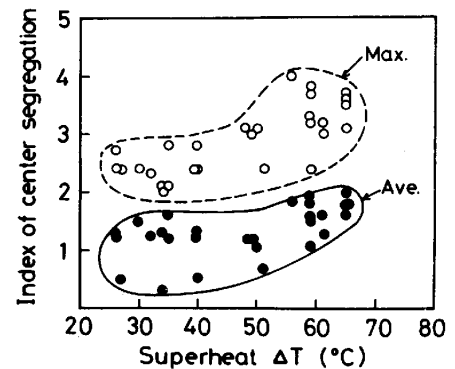


Fig.5 Effect of superheat in tundish on the center segregation

Stirring condition	Reduction ratio of drawing (%)		Drawing condition
	10	20	
Non-Stirred	Low	Low	Dimension of material 11.5φ as roll Approaching angle of die 25° Reduction ratio 10%
M-Stirred	Medium	Medium	
M+F-Stirred	High	High	

Fig.6 Effect of stirring on the drawability of spring steel

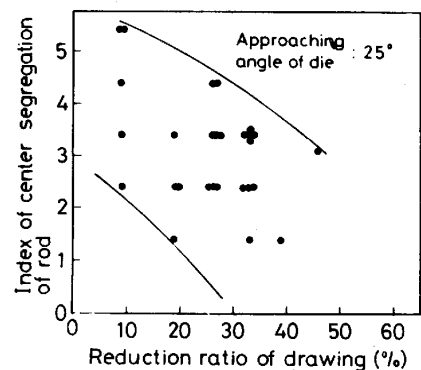


Fig.7 Relation between drawability and center segregation of rod

ついて主として調査した。タンディッシュ内の溶鋼のスーパーヒートは30~40℃であった。

M攪拌を行わない場合、各炭素鋼とも曲げ内側の等軸晶域は全く生じず、曲げ外側も0.35% Cの中炭素鋼を除いて等軸晶域は生じていない。この鋳片にM攪拌を行うと等軸晶域が曲げ内外とも生じるようになり、攪拌強度の増加とともに等軸晶域は増加する<sup>4)</sup>

Fig.8 に示すように等軸晶域の巾は炭素鋼のC%により異なり、0.35% Cの中炭素鋼の場合、0.12% Cの低炭素鋼や0.51% Cの高炭素鋼の場合に比較して広い等軸晶が弱い攪拌強度でも容易に得られる。同様な関係はブルーム連鋳の場合にも認められており<sup>5)</sup>、広い等軸晶域が比較的得にくい低炭素鋼や高炭素鋼の場合、組合

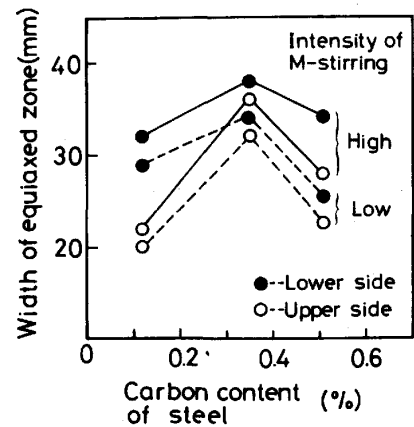


Fig.8 Relation between carbon content of steel and width of equiaxed zone

わせた攪拌が必要となる。

ブルーム連鋳の場合と同様に鋳片中心より連続して4mmφドリルで採取したサンプルのC分析の結果を各攪拌条件別にFig.9 に示す。0.35% Cの中炭素鋼ではM攪拌により中心偏析のパラッキと平均値の両方がかなり改善されており、M+Fの組合せ攪拌により、中心偏析がいったん低下している。いっぽう0.51% Cの高炭素鋼では鋳型内攪拌により中心偏析のパラッキがわずかに改善されるだけで、中心偏析の改善効果は少ないが、M+Fの組合せ攪拌により中心偏析のパラッキ、平均値ともに大きく改善される。この中心偏析の改善はマクロ組織においても

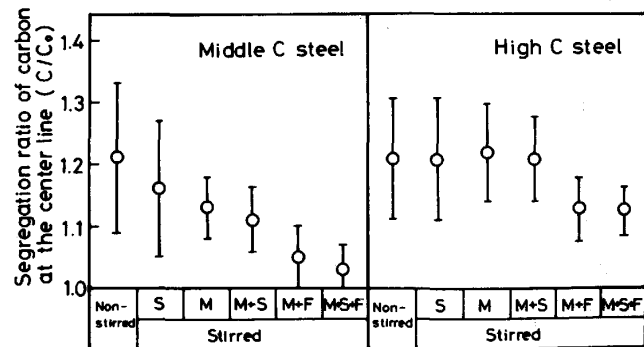


Fig.9 Effect of stirring on the center segregation of billet

Photo.1 に示すように明確に認められ、中心偏析の改善が進むにつれて、キャビティや中心偏析線が不明瞭となっている。

4. 組合せ攪拌による中心偏析改善法

鋳型下の二次冷却帯の攪拌(S攪拌)に比較し、M攪拌の方が均一で巾広い等軸晶帯が得られるが<sup>4)</sup>、これは主として凝固速度の大きい鋳型内での攪拌により凝固界面で柱状晶の先端が切断されて生じた多数の結晶の破片が溶鋼プール中で再溶解され、溶鋼プールの温度を低下させたためと考え

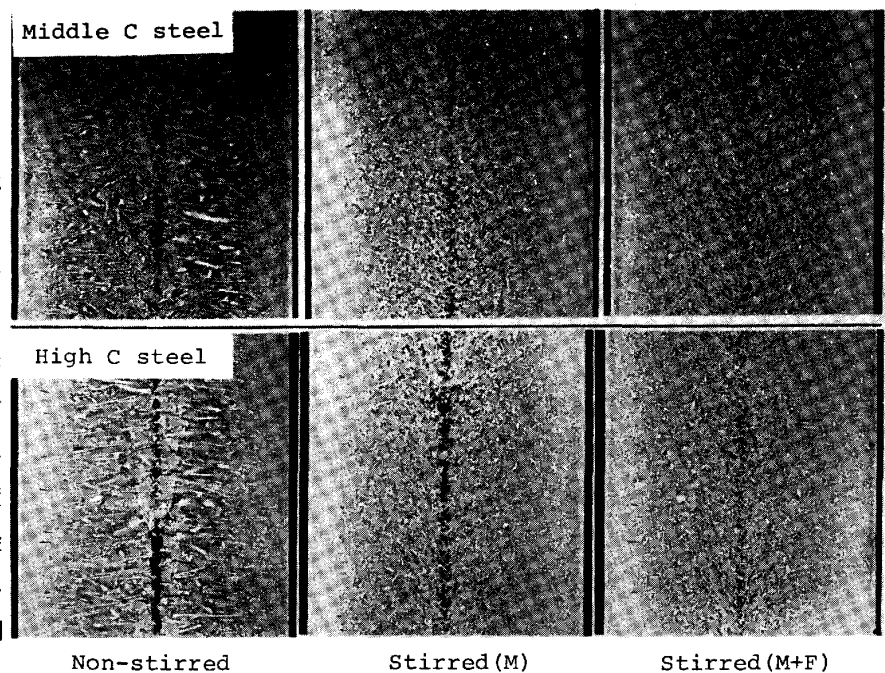


Photo.1 Macrostructure of 125mm c.c. billet

られ、M攪拌によって溶鋼プールの温度が低下するようすは、Fig.10に示すように鋳型下の二次冷却帯の攪拌の強度を一定にしておき、M攪拌の強度を増加していった場合に、S攪拌の負偏析が減少することからも確かめられる。これはM攪拌により溶鋼プールの温度が低下し、溶鋼の粘性が高くなった結果、同一攪拌強度での攪拌流速が低下したためと考えられる。

M攪拌により低温鋳造の場合のように微細な等軸晶帯が広く形成され、ブリッジングが防止される結果、キャビティや中心偏析が改善される。この効果は特に等軸晶の発生しやすい中炭素鋼において顕著に求められ、かなりの改善がM攪拌のみで得られるが、等軸晶が比較的発生しにくい低炭素鋼や高炭素鋼の場合、組合せ攪拌が必要となる。M+Sの組合せでは低、高炭素鋼の場合はM攪拌に比較し、等軸晶帯が増加するものの、中炭素鋼の場合と比較して少ないため、中心偏析改善効果は少ない。これに対し、M+F攪拌では大きな改善効果が得られているが、このF攪拌の役割については次のように考えられる。

凝固末期においてM攪拌により生じた微細な等軸晶の混じった溶鋼プール内で適当な強度で攪拌することにより、溶鋼プールの温度が低下し、等軸晶粒の結合が生じ、固液共存相内での残溶鋼の移動が妨げられた結果、中心偏析が改善されたと考えられる。また凝固末期において過度の攪拌を行うと

中心偏析が悪化するが<sup>6)</sup>、これは等軸晶粒の結合する速さより切断される速さの方が大きくなったことと、強攪拌によりバルク溶鋼中に合金成分が濃化されたため、残溶鋼の粘性が低下した<sup>7)</sup>ことにより、固液共存相内で残溶鋼の移動が生じやすくなったためであると考えられる。このためFig.11に示すように攪拌強度と攪拌時の残溶鋼中の固相率には最適な範囲が存在する。

5. 結 言

鋳型内攪拌を含む組合せ攪拌により、ブルーム、ビレットの連铸々片および製品中の中心偏析を改善することができ、高炭素鋼線材のカッピー破断等中心偏析に起因する欠陥を大巾に減少することができた。

参考文献

- 1) 森、綾田： 神戸製鋼技報、29(1979)3,P16
- 2) 喜多村、小島、大西、成田、森： 鉄と鋼 66(1980)11,S.789
- 3) 綾田、成田、森、大西： 鉄と鋼 67(1981) 8,P.1278
- 4) 綾田、藤本、森、若杉、小島、植岡、加藤、堂谷： 鉄と鋼 69(1983) 4,S271
- 5) 喜多村、川崎、松尾、朝永、嶋津： 神戸製鋼技報、33(1983)2,P.89
- 6) 綾田、森、成田、大西： Rev. Metal 79(1982)4 P.371
- 7) 高橋、工藤、永井： 鉄と鋼 68(1982) 6,P.623

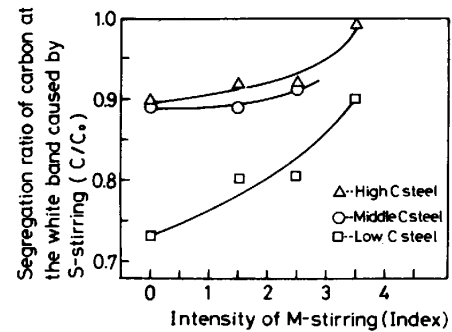


Fig.10 Decrease of negative segregation by M-stirring

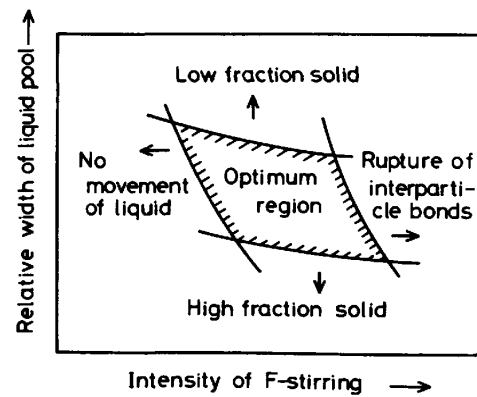


Fig.11 Diagram of optimum stirring condition of F-stirring