

論 文

UDC 621.746.047 : 66.063.8 : 537.852.1 : 620.192.43

連鑄々片負偏析におよぼす鑄型内電磁攪拌の影響

綾田研三*・成田貴一*²・森 隆資*²・大西稔泰*³

Influence of Electro-magnetic Stirring at Mold on Negative Segregation in Continuously Cast Bloom

Kenzo AYATA, Kiichi NARITA, Takasuke MORI, and Toshiyasu OHNISHI

Synopsis :

The fluid flow induced by electro-magnetic stirrer at the mold and the negative segregation caused by the fluid flow were investigated. The surface velocity of molten steel was obtained from the analysis of movie film taken by a high speed camera, and the flow velocity below the meniscus was estimated as compared with the fluid flow of low melting temperature metal. The experiment was carried out for low, middle and high carbon steels (0.13% C~0.64% C).

From the experimental result, it has been found that the degree of the negative segregation increases with the increase of flow velocity and with the decrease of carbon content of steel. The maximum depth in the mushy zone washed by bulk liquid and the width of the mushy zone are calculated, and the reason of the increase of the degree of negative segregation with the decrease of carbon content of steel is considered.

1. 緒 言

最近の鋼の連続鑄造技術の進歩は著しく、従来、連鑄化が困難とされていた鋼種も取鍋精錬技術の進歩とあいまつて、しだいに連続鑄造により製造されてきている。連鑄化困難とされていた理由は、非金属介在物、ブローホール、中心偏析などの鑄片品質に対する要求がきびしいためであるが、このような鑄片品質を大幅に改善する方法として電磁攪拌技術の応用が注目され、連鑄機に取付けた電磁攪拌装置による溶鋼流動が鑄片品質に与える影響について多くの実験、研究が進められている^{1)~5)}。一般に中心偏析などの鑄片品質は溶鋼流動が強くなるほど改善されるが、溶鋼流動時の凝固界面近傍に負偏析帯が形成され、鑄片の均質性をそこない、焼入性などの素材品質を低下させる場合がある⁶⁾。したがって、鑄片品質改善効果の低下を招かないように溶鋼流動を制御し、適度な攪拌強度で作業をおこなう必要がある。

溶鋼流動による負偏析帯の形成については、回転チル円筒を用いた高橋らの研究⁷⁾と2次冷却帯における電磁攪拌装置を用いた杉谷らの研究⁸⁾とがあるが、いずれも

溶鋼流速の測定が間接的な方法でなされており、測定された溶鋼流速には疑問があつた。さらに鋼中のC量の減少とともに負偏析度が増加する傾向が認められていた⁹⁾が、この原因については明確でなかつたため、本実験では鑄型内に設けた電磁攪拌装置により、溶鋼を流動させ溶鋼の湯面流速の測定を行い、溶鋼流速と負偏析度との関係を0.13~0.64%炭素鋼の炭素含有量の異なる鋼について求めた。この結果、溶鋼流速と負偏析度と鋼中のC量との間の関係式を見出し、この式をもとに鋼中のC量の減少とともに負偏析度が増加する理由を考察した。

2. 実験方法

2.1 ブルーム連鑄鑄型内電磁攪拌

神戸製鉄所の2号ブルーム連鑄機の1ストランドのみを300×400mm²サイズの鑄片を鑄造できるようFig. 1に示すように改造し、電磁攪拌装置を収納した鑄型を新たに製作し、設置した。電磁攪拌装置を内蔵した鑄型の断面をFig. 2に示す。攪拌方向は水平面内の回転で低周波電源により駆動される。この攪拌装置の諸元を

昭和55年11月7日受付 (Received Nov. 7, 1980)

* (株)神戸製鉄所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鉄所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)*³ (株)神戸製鉄所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd.)

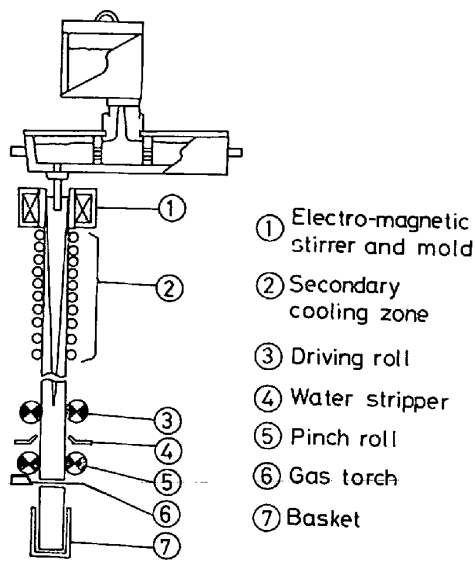


Fig. 1 Schematic representation of bloom C. C. machine at Kobe Works.

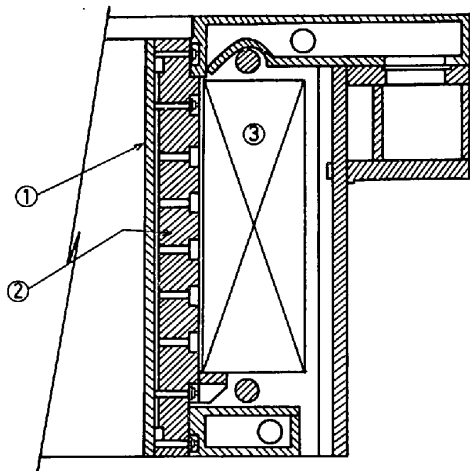


Fig. 2 Electro-magnetic stirrer at the mold.

Table 1. Specifications of electro-magnetic stirrer at the mold.

Stirring direction	Rotation in the horizontal plane
No. of phases	2
Frequency	2 Hz
Electric current	Max. 2300A
Voltage	Max. 100 V
No. of poles	2

Table 1 に示す。

铸造はパウダーと浸漬ノズルを用いておこない、5 鋼種の鋼について調査した。これらの鋼種は炭素含有量から Table 2 に示す 3 種の鋼に分類した。Table 2 には铸造条件も示されており、0.45 m/min の铸造速度で铸

Table 2. Chemical compositions of test steels and casting condition.

Kind of steel	Chemical compositions of steel (wt%)						Super-heat (°C)
	C	Si	Mn	P	S	Al	
Low C steel	0.13 ~ 0.19	0.01 ~ 0.21	0.40 ~ 0.50	0.015 ~ 0.023	0.015 ~ 0.021	0.002 ~ 0.047	19 ~ 84
Middle C steel	0.45	0.29	0.74	0.024	0.022	0.027	39 ~ 46
High C steel	0.60 ~ 0.64	0.20 ~ 1.78	0.88 ~ 0.97	0.018 ~ 0.026	0.012 ~ 0.019	0.020 ~ 0.030	17 ~ 70
Casting speed 0.45 m/min							

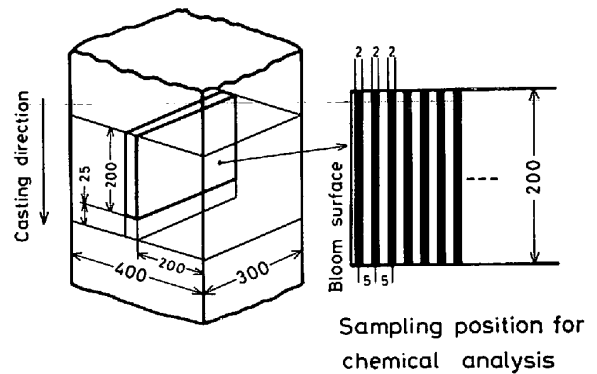


Fig. 3 Sampling position of test bloom.

型内で搅拌しつつ铸造した。

2-1-1 铸片の凝固組織と負偏析調査

铸型内搅拌により形成された負偏析部の凝固組織と負偏析度を調査するため、铸片広面側より Fig. 3 に示すように铸造方向に長さ 225 mm の縦断面サンプルを切り出し、25 mm 長さの部分は凝固組織調査のため研磨し、ステッド氏液で腐食した。残り 200 mm 長さの部分からは Fig. 3 に示すように、铸片引き抜き方向に沿って幅 2 mm、深さ 2 mm の溝状に铸片を切削し、铸片表面より 5 mm 間隔で分析用サンプルを採取し、C と S の分析をおこなった。

2-1-2 溶鋼流速の測定方法

铸型内で搅拌され、流動している溶鋼の観察を容易にするため、オイルキャストリングにより铸造をおこない、铸型上部より高速度カメラで湯面を撮影した。撮影速度は約 500 コマ/s であり、正確な撮影速度はフィルム上に撮影時に一定周期で同時に記録されるマークより求めた。湯面における溶鋼流速は、撮影されたフィルムより映像解析装置を用いて、湯面に浮いている直径約 5 ~ 8 mm 程度のスカムの動きを追跡することにより測定した。測定をおこなった鋼種は低炭素鋼のもので、搅拌電流は 900 A から 2300 A まで、9 段階の搅拌強度で搅拌され、各搅拌強度で広面に沿った流れから 30 ~ 60 点程度の流速測定データが得られ、その平均値を各搅拌強度

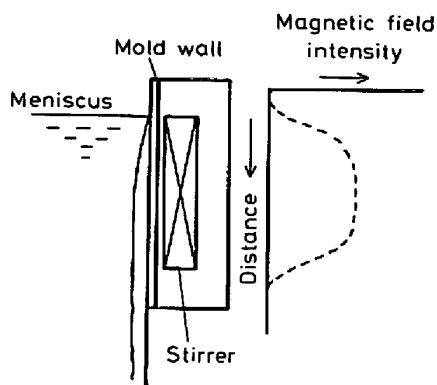


Fig. 4 Schematic representation of the variation of magnetic field intensity at the inner wall of mold.

に対する流速とした。また、撮影は鋳型直上よりおこなえないため、画面より測定されたスカムの動きはカメラと鋳型の位置関係を考慮して補正した。

いづぼう、鋳型内の磁束分布は鋳片引き抜き方向に Fig. 4 に示すように変化しており、攪拌装置中央で最大となっているため、鋳片引抜方向に流速が変化することが考えられる。そこで湯面における流速と攪拌装置中央での流速の差を調査する目的でウッドメタル (m. p. 72 °C) をステンレス槽に入れ、約 150°C に加熱溶解したものを鋳型内に入れ、Fig. 5 に示すようにステンレス製のプロペラをウッドメタル浴槽に挿入し、湯面と攪拌装置中央とにおけるプロペラの回転数の変化を攪拌強度を変えて測定した。得られた回転速度より、広面側の流速を計算し、湯面と攪拌装置中央との流速と攪拌電流との関係を求めた結果を同図に示す。同図から明らかなように、鋳型内の湯面と攪拌装置中央部でのウッドメタルの流速の差はわずかである。

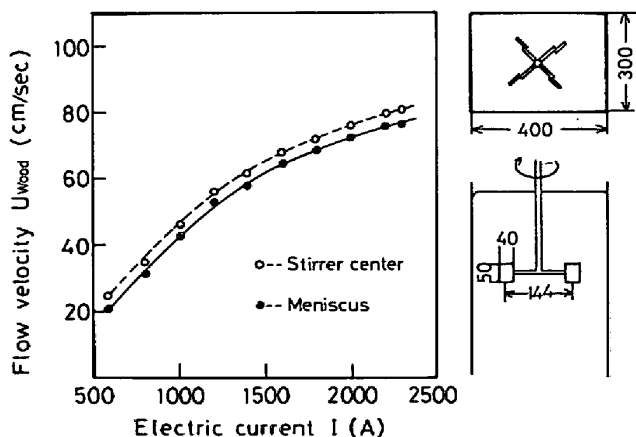


Fig. 5. Relation between electric current I and velocity of wood metal U_{wood} , and method of measurement.

なお、シェル厚の影響は攪拌装置中央でも 20 mm 以下であり¹⁰⁾、用いている周波数が磁場強さの減衰率の低い低周波であることから、磁場の減衰は 5% 程度と計算され、鋳型内のシェル厚の影響は無視してもよいと考えられる。

3. 実験結果および考察

3.1 凝固組織調査結果

Photo. 1 に鋳型内攪拌をおこなった場合とおこなわない場合の凝固組織の変化を高炭素鋼の場合について示す。攪拌をおこなわない場合は鋳片表面より柱状デンドライトが鋳片中心に向かって成長するため、縦断面で柱状デンドライトの形態が明瞭に観察されるが、攪拌をおこなったものでは攪拌による溶湯流動の方向に逆らつてデンドライトが成長する^{7)11)~13)}ため、縦断面ではデンドライトの形態が認められない。

また、攪拌をおこなわない場合は柱状デンドライトが鋳片表面より約 70 mm まで成長しているのに対し、攪拌をおこなったものでは鋳片表面より約 35 mm で柱状デンドライトの成長が止まり、等軸デンドライトが現われている。中炭素鋼、低炭素鋼の場合でも同様な傾向が見られた。

別におこなわれた鋳型内サルファー添加により、攪拌時のシェル厚の測定を行つた結果、低炭素鋼の場合、鋳型出口で 30~40 mm のシェル厚さであることが求められており¹⁰⁾、C量によつて鋳型内の凝固定数は大きく変化しない¹⁴⁾ことから、鋳片表面より約 40 mm 以下の部分が鋳型内攪拌の影響を強く受けて凝固したと考えられる。

3.2 溶鋼流速測定結果

湯面の溶鋼流動を高速度カメラにより撮影し、広面側に沿つた流れの速さを求めた。鋳片表面より中心までを 30 mm 幅ごとに分割し、各ゾーンごとの平均流速を求めた。鋳片周辺部へ向うほど流速は大きくなるが、鋳型壁に接した所では鋳型壁との摩擦により、また、鋳型壁により溶鋼が冷却されるため、鋳片表面から 30~60 mm の領域の流速とほとんど差がなくなり、鋳片表面から 30~60 mm の領域の流速値の方が鋳片表面から 30 mm までの湯面の波立ちを伴う領域の流速値に比べ、ばらつきが小さいため、前者を各攪拌強さにおける代表流速とした。

Fig. 6 に溶鋼の湯面での流速測定結果を示すが、攪拌電流の上昇とともに鋳型壁から 30~60 mm の領域における溶鋼流速はほぼ直線的に増加している。Fig. 5 に示すウッドメタルの湯面における流速測定結果と Fig. 6

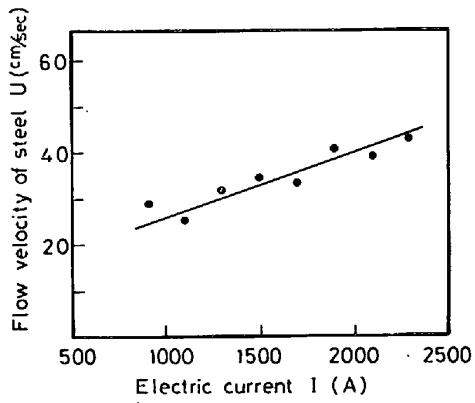


Fig. 6 Relation between electric current I and flow velocity of steel U .

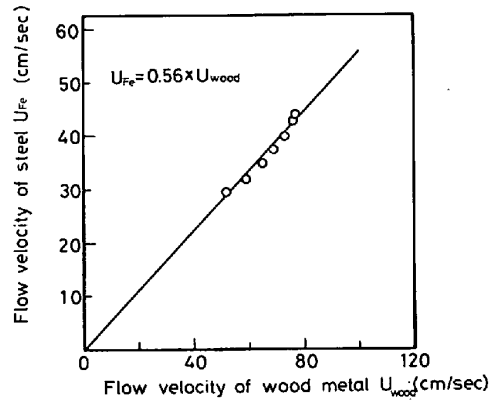


Fig. 7 Relation between flow velocity of wood metal and steel.

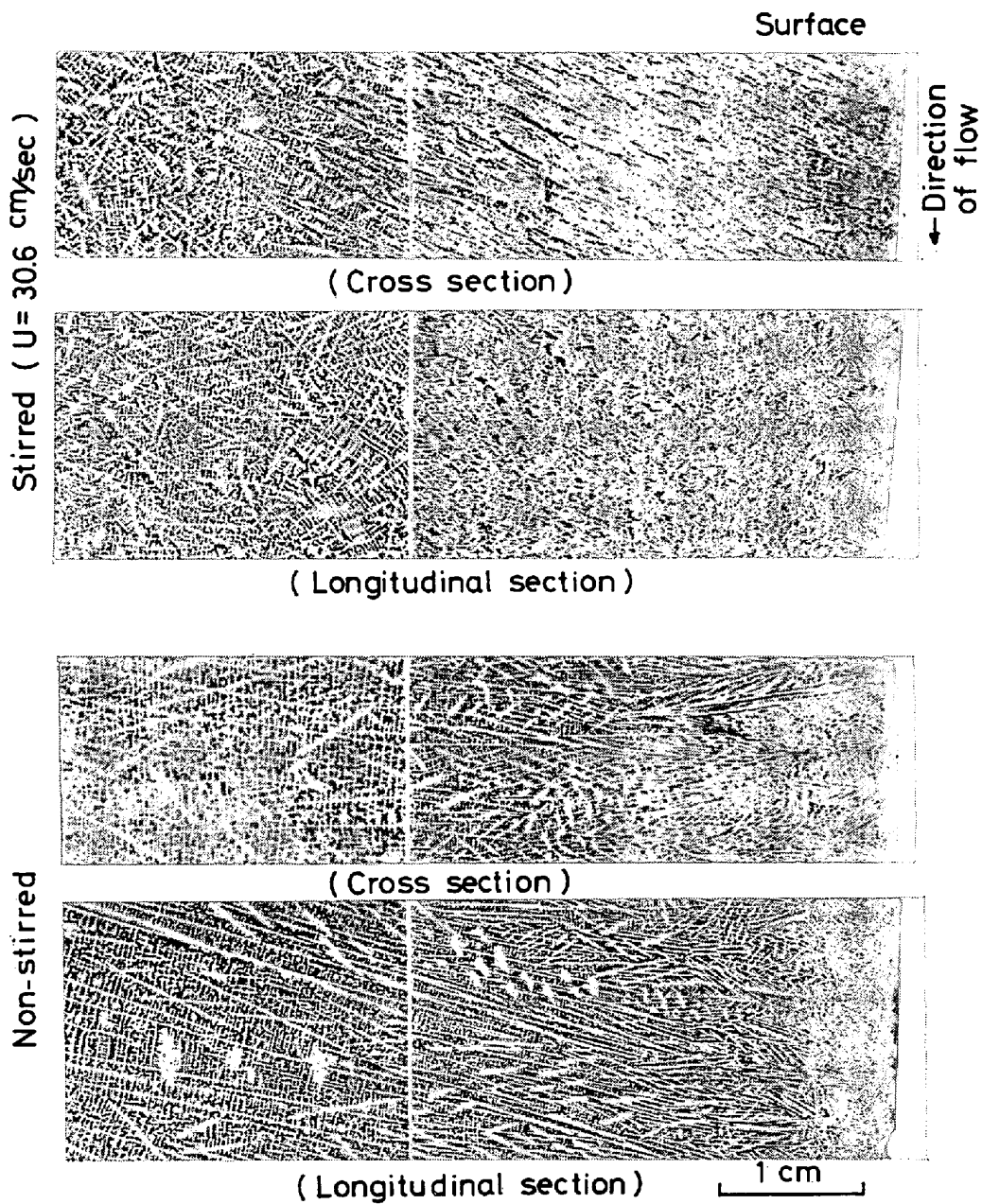


Photo. 1 Dendrite morphologies near the surface of C. C. bloom (High carbon steel).

の溶鋼の湯面における流速測定結果とから、ウッドメタルの流速 U_{wood} と溶鋼の流速 U_{Fe} との関係性を求めた結果を Fig. 7 に示す。同図より溶鋼流速とウッドメタルの流速との間にはつぎの関係式が成立つ。

$$U_{Fe} = 0.56 \times U_{Wood} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式を用いて Fig. 5 に示す攪拌装置中央におけるウッドメタルの最大流速から攪拌装置中央における溶鋼の最大流速を求めた。

3.3 鑄片表層部の負偏析調査結果

鑄型内攪拌によつて鑄片表層部の溶質元素の分布がどのように変化するかをCとSの分析より調査した。攪拌電流を増加し、流動速度を増加させた場合のCとSの分布の変化を高炭素鋼の場合について Fig. 8 に、低炭素

鋼の場合について Fig. 9 に示す。攪拌を行わない場合は表層部のC、S量ともほとんど変化せず、ほぼ一定の値を示している。鑄型内では浸漬ノズルからの吐出流による溶鋼流動があるが、この程度の溶鋼流動では鑄片内の溶質分布に影響しないことを示している。これに対し、攪拌流速が増加するほど、鑄片皮下約 40 mm の範囲でC、S量の減少が見られ、負偏析帯より内部側ではC、S量が溶鋼の平均濃度よりわずかに増加している。また、最大の負偏析が生じるメニスカスからの位置は低炭素鋼の場合にS添加試験により得られた凝固シェル厚測定結果¹⁰⁾より求めると、Fig. 10 のようにほぼ攪拌装置の中央に位置していることがわかり、最大磁場強さの部分に対応している。また、最大負偏析位置は Photo. 1 と比較することにより、柱状晶域で生じていることがわかる。最大負偏析位置での凝固速度 V は鑄型内S添加試験より求められ、攪拌強度の増加とともにシェル厚は薄くなり、凝固速度は遅くなる¹⁰⁾が、この実験条件の範囲においては 0.029~0.032 cm/s とごく狭い範囲でしか

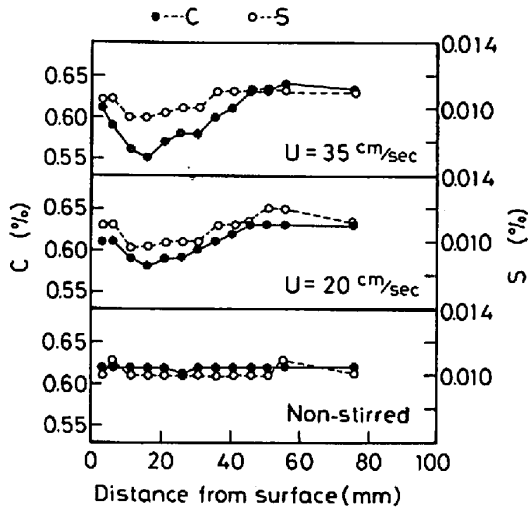


Fig. 8 Variation of carbon and sulfur content near the surface of C. C. bloom (High carbon steel).

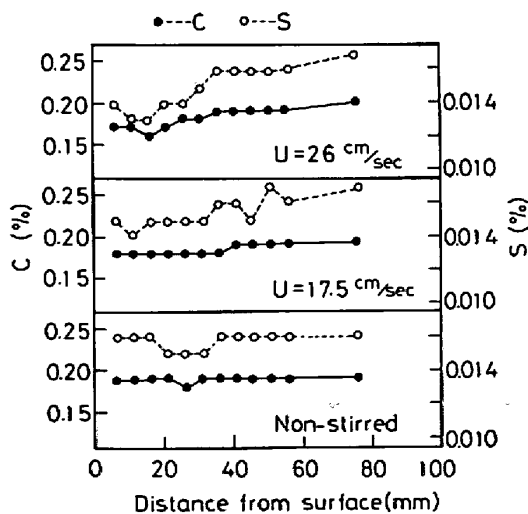


Fig. 9 Variation of carbon and sulfur content near the surface of C. C. bloom (Low carbon steel).

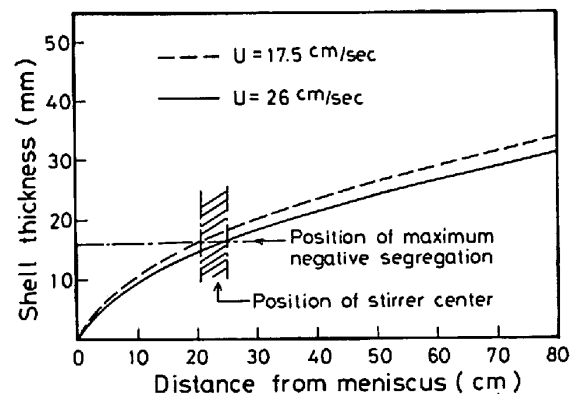


Fig. 10 Position of maximum negative segregation.

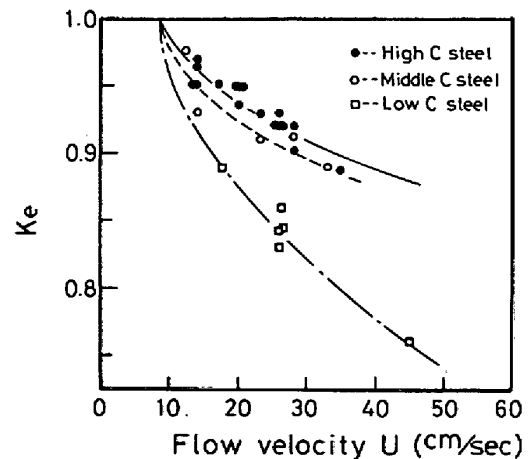


Fig. 11 Relation between flow velocity U and effective distribution coefficients of carbon.

変化しないため、凝固速度 V は約 0.030 cm/s で一定であると考えた。

つぎに、負偏析帯における溶質濃度の低下と攪拌流速との関係を調べるため、負偏析帯での溶質元素の最大負偏析値 \bar{C}_S を铸型内溶鋼より採取した試料中の溶質元素の濃度 C_0 で除した実効分配係数 K_e の変化として、低炭素鋼、中炭素鋼、高炭素鋼の場合についておのおのの炭素の分析結果より求められた値をプロットした結果を Fig. 11 に示す。従来から言われているように溶鋼流速の増加とともに実効分配係数 K_e の減少が見られる⁷⁾⁸⁾が、高炭素鋼、中炭素鋼、低炭素鋼の順に C 量が減少するほど、実効分配係数の低下が大きい。また、流速の低下とともに K_e の値は 1 に近づくが、溶鋼流速 9 cm/s 付近で K_e が 1 になる傾向が見られた。Fig. 12 には S の実効分配係数の変化を示すが、C の場合に比べ鋼中の S の含有量が低いため、分析結果より求められた実効分配係数の値はばらつくが、鋼中の C 量が低下するほど実効分配係数の低下が認められる。

つぎに溶鋼流速 U と C の実効分配係数 K_e と鋼中の C 量との間の関係を示す実験式を求めるため、まず、データ量の多い高炭素鋼について

$$1 - K_e = A(U-9)^\alpha \dots\dots\dots (2)$$

とおき、 A と α の値を求め、 $A = 1.42 \times 10^{-2}$ 、 $\alpha = 0.60$ を得た。他の鋼種についてはデータ量が少いため、 $1 - K_e$ の値が $(U-9)^{0.60}$ に比例するとして傾き A の値を低炭素鋼、中炭素鋼の場合について求め、それぞれ、 2.91×10^{-2} 、 1.76×10^{-2} の値を得た。この結果を Fig. 13 に示す。次に C 量の変化が同図の直線の傾きに影響を与えていると考えられるため、C 量に対する A 値の変化を求めると

$$A = (3.93C^2 - 6.19C + 3.75) \times 10^{-2} \dots\dots\dots (3)$$

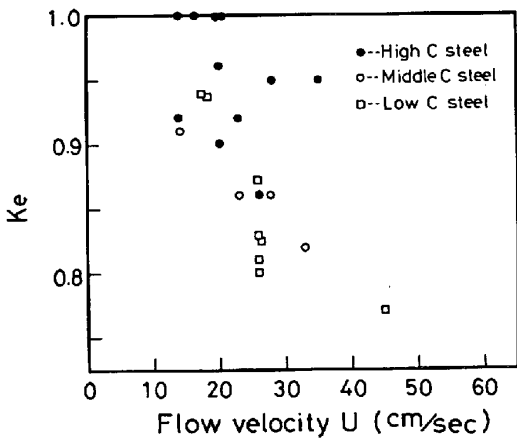


Fig. 12. Relation between flow velocity U and effective distribution coefficients of sulfur.

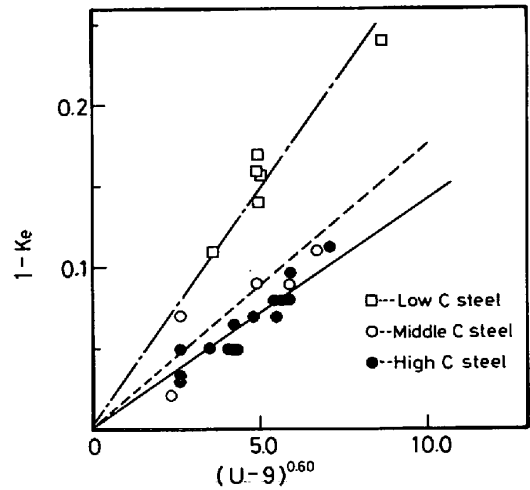


Fig. 13 Relation between $(U-9)^{0.60}$ and $1-K_e$.
 U : Flow velocity (cm/s)
 K_e : Effective distribution coefficient of carbon

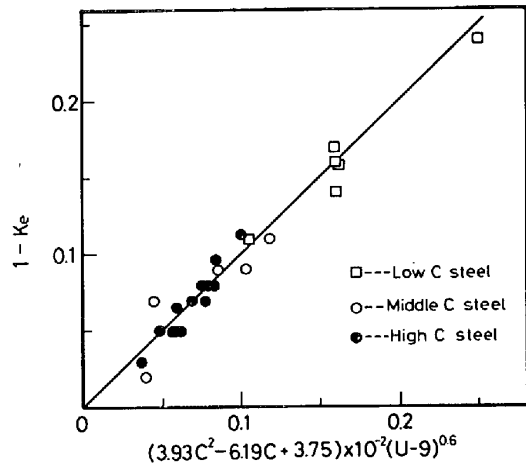


Fig. 14 $1-K_e$ as a function of empirical equation.

となつた。この時、高炭素鋼、中炭素鋼、低炭素鋼の C の代表値として 0.62 、 0.45 、 0.15% を使用した。(2)、(3)式より C の実効分配係数に与える溶鋼流速と C 濃度の影響を示す実験式が次のように求められた。

$$1 - K_e = (3.93C^2 - 6.19C + 3.75) \times 10^{-2} (U-9)^{0.60} \dots\dots\dots (4)$$

この実験式より求められた右辺の値と C の分析結果より得られた左辺の値とをプロットした結果を Fig. 14 に示す。

3.4 考察

铸型内攪拌をおこなつた際、生じた溶鋼流動により形成される铸片表層部負偏析帯の負偏析度と溶鋼流速との関係を考察するため、高橋らの回転チル円筒を用いた実験結果⁷⁾や、杉谷らの 2 次冷却帯での攪拌実験の結果⁸⁾

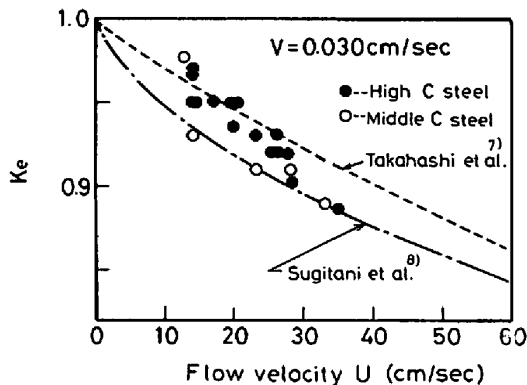


Fig. 15 Comparison of effective distribution coefficients of carbon K_e .

と比較検討した。

今回の実験はC量の異なる3種の鋼についておこなったが、ほとんど同じシェル厚の所で最大負偏析を示しており、凝固速度はほぼ一定 ($V=0.030$ cm/s) と考えられるため、凝固速度については考慮せず、また、Cの実効分配係数についてのみ実効分配係数と流速との間の関係を示す式を得た。そこで凝固速度が 0.030 cm/s の場合について本実験から得られたCの実効分配係数の変化と、高橋、杉谷らの報告している関係式より得られた結果とを比較した。Fig. 15にCの実効分配係数 K_e の溶鋼流速に対する変化を比較して示す。図中●印は今回の実験で得られた高炭素鋼の結果であり、○印は中炭素鋼の結果である。高炭素鋼の実験結果は高橋らの得た結果に近く、中炭素鋼の実験結果は杉谷らの結果に近い。これは高橋らの実験が $0.60\sim 0.82\%$ C鋼に対しておこなわれ、杉谷らの実験が 0.45% C鋼に対しておこなわれたため、今回の実験に使用された高炭素鋼、中炭素鋼のC量にそれぞれ近かったためであろうと考えられる。

また、今回の実験は前2者の実験と比較して流速の小さい条件でおこなわれ、凝固界面前方の溶鋼流速が 9 cm/s 程度以下になると負偏析が生じなくなる傾向を示しているが、これは凝固界面前方の流れが遅いと実質的にデンドライト樹間内の溶鋼流動は生じなくなるためであると考えられる。

つぎに溶鋼流動により、マッシュゾーン内の濃化溶鋼が流動し、デンドライト樹間内の濃化溶鋼がバルク溶鋼とおきかわることにより、負偏析帯が生じるが、バルク溶鋼がデンドライト樹間内を洗浄する最大の固相率 f_M を低炭素から高炭素鋼に至るC量の異なる鋼について(4)式とつぎの(5)式を用いて計算した結果をFig. 16に示す。

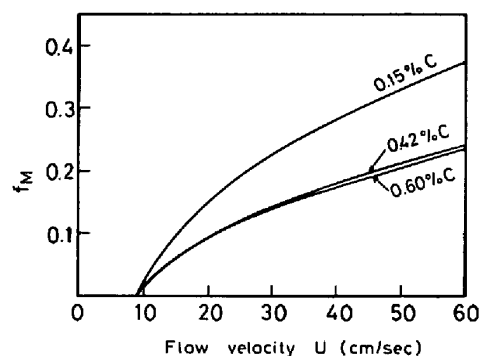


Fig. 16 Relation among flow velocity U , maximum fraction of solid washed by bulk liquid of steel f_M and carbon content of steel.

$$f_M = \frac{1 - K_e}{1 - k_0} \dots \dots \dots (5)$$

[k_0 : 高炭素鋼のCの平衡分配係数(0.34)
中、低炭素鋼のCの平衡分配係数(0.17)]¹⁵⁾

図に示すように流速が増加するほど最大洗浄固相率が大きくなり、鋼中のC量が低下するほど最大洗浄固相率が大きくなる。溶鋼流速が増加するほど最大洗浄固相率が大きくなる理由については溶鋼流速の増加とともにバルク溶鋼がマッシュゾーン内に侵入する深さが深くなると説明されている⁷⁾が、C量については電磁攪拌時の負偏析度が高炭材ほど減少する傾向があることが報告されている⁹⁾だけで、C量が洗浄深さにおよぼす影響についての説明がないため、この点について考察した。

管内での流れが乱流の場合、管壁面が平滑か粗かにより、流体と管壁との摩擦係数が異なり、粗面の場合、凹凸の高さが大きくなると摩擦係数が増加し、管内の流速分布に影響を与え、管壁面前方の流速が低下する¹⁶⁾ことが知られている。いつぼう、鋼の凝固界面でも柱状デンドライトの先端が凹凸面を形成していると考えられ、この凹凸面が凝固界面付近の流れに影響を与え、洗浄深さが変化したと考えられる。凝固界面における凹凸をマッシュゾーンの幅と考え、まず、マッシュゾーンの幅がC量によりどのように変化するかを伝熱計算により求めた。

伝熱計算は鋳片横断面方向の2次元の差分法を用いて行い、 0.15% C、 0.42% C、 0.60% Cの各C%の鋼を 300×400 mm 断面の鋳型内に過熱度 40°C 、引き抜き速度 0.45 m/min で鋳造した場合の鋳型内攪拌装置中央位置における位置でのマッシュゾーンの幅を計算した。各鋼の液相線、固相線温度¹⁷⁾は 0.15% 炭素鋼については 1523°C 、 1465°C を用い、 0.42% 炭素鋼について

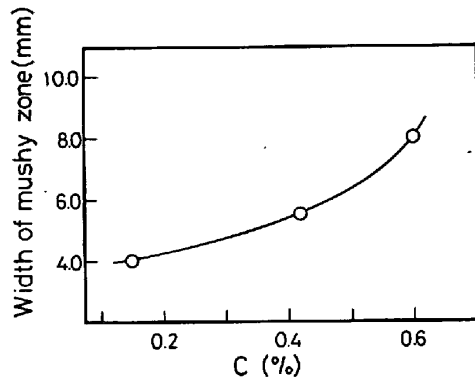


Fig. 17 Relation between carbon content of steel and width of mushy zone.

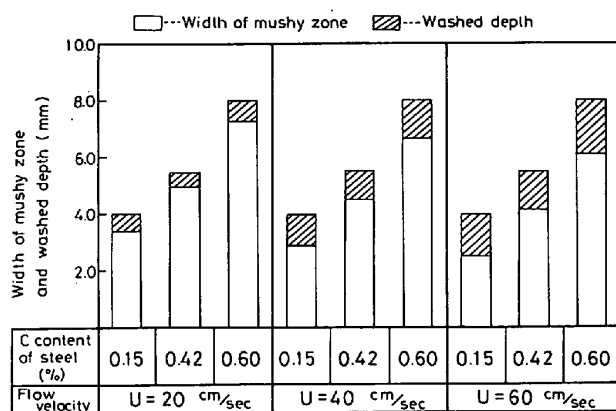


Fig. 18 Variation of washed depth in the mushy zone.

は 1493°C, 1420°C を, 0.60% 炭素鋼については 1483°C と 1387°C を用いた。

伝熱計算より求めた鋼の C 量によるマッシュゾーン幅の変化を Fig. 17 に示す。C 量の増加とともにマッシュゾーン幅も増加し, 0.15% 炭素鋼にくらべ, 0.60% 炭素鋼では約 2 倍程度広がっており, このマッシュゾーン幅の変化が最大洗浄固相率に影響を与えたと推察される。

つぎに Fig. 16 で求められた低炭素鋼, 中炭素鋼, 高炭素鋼の場合の溶鋼流動による最大洗浄固相率と伝熱計算より求められたマッシュゾーン幅とから, 固相率と洗浄深さが比例するとしてバルク溶鋼の流動による洗浄深さを求めた。この結果を Fig. 18 に示す。すなわちバルク溶鋼の流速の増加とともに洗浄深さは深くなり, 60 cm/s の流速に対し, 約 2 mm 程度の深さまで洗浄を受けることになるが, 鋼の C 量に対する変化はあまり見られない。

このことから, C 量によりマッシュゾーン幅は変化し, C 量の増加とともにマッシュゾーン幅は広がる

が, 柱状晶先端部がバルク溶鋼により洗浄を受ける深さはマッシュゾーン幅に関係せず, 液相線温度位置から固相線温度位置方向にはほぼ同じ深さ入ったところまで洗浄を受けることがわかる。したがって, バルク溶鋼の流動が影響を与えるマッシュゾーン内の洗浄領域は溶鋼流速の増加とともに拡大するが, この程度の流速範囲の場合には, この洗浄域は一定深さに限られている。このためマッシュゾーン幅が狭い場合, マッシュゾーン幅に対する洗浄域の幅の比がマッシュゾーン幅が広い場合に比較して増大し, この結果最大洗浄固相率が大きくなり, 負偏析度が増加すると考えられる。

負偏析度は C 量の他に凝固速度によっても影響を受け, 凝固速度が小さくなるほど負偏析度は大きくなり, したがって実効分配係数は小さくなる⁷⁾⁸⁾といわれており, この原因についてはデンドライト樹間の間隔が凝固速度の低下とともに広がり, 洗浄深さが深くなると説明されている⁸⁾。したがって負偏析度に対してはマッシュゾーン幅とデンドライト樹間々隔が影響すると考えられる。同一凝固速度では C 量の増加とともにわずかながら一次アームスペーシングが増加することが認められている¹⁰⁾が, 本実験での鋼の C 量の範囲が比較的狭いことと凝固の初期に近く, デンドライトの一次のアームスペーシングが狭いため, 洗浄深さにほとんど影響を与えなかつたと考えられる。

以上, C 量の異なる鋼について同一凝固速度におけるマッシュゾーン幅の変化から, C 量によつて負偏析度が変化する理由を考察した。

4. 結 言

連铸機に取り付けた铸型内電磁攪拌装置による攪拌実験から, 溶鋼流動により形成される負偏析帯の調査をおこない, 凝固速度が 0.030 cm/s の場合, 溶鋼流速と負偏析度と鋼中の C 量に関し, つぎの結果を得た。

(1) 溶鋼流速の増加とともに負偏析度は増加し, さらに同一流速のもとでは鋼中の C 量が低下するほど負偏析度は増加する。

(2) C 量の異なる鋼では同一凝固速度におけるマッシュゾーン幅が異なり, C 量が増加するほどマッシュゾーン幅は広がるが, 溶鋼流動により洗浄を受ける領域はマッシュゾーン幅にかかわらず一定であるため, マッシュゾーン幅の狭い低炭素鋼では負偏析度が増加する。

(3) C の実効分配係数を K_e とし, 溶鋼流速を U (cm/s) とし, 鋼中の C 量を C (%) とすると K_e と U と C の間には次の実験式が成立つ。

$$K_0 = 1 - (3.93C^2 - 6.19C + 3.95) \times 10^{-2}(U-9)^{0.60}$$

ただし, $(0.13 \leq C \leq 0.64\%)$

文 献

- 1) R. ALBERNY, L. BACKER, J. P. BIRAT, P. GOSSELIN, and M. WANIN: *Elect. Fur. Steel Conf. Proc.*, (1973), p. 237
- 2) R. ALBERNY, J. P. BIRAT, J. CHONÉ, L. ANGEL, E. GRETHEN, R. GOETZINGER, and N. KAELL: *Rev. Mét.*, 4 (1979) 76, p. 235
- 3) D. HURTUK and A. TZAVARAS: *Met. Trans.*, 8B (1977), p. 243
- 4) 岩田 齊, 山田勝彦, 藤田照夫, 林 享三: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2972
- 5) 森 隆資, 綾田研三: 神戸製鋼技報, 29 (1979) 3, p. 16
- 6) 大西稔泰, 高木 弥, 江波戸紘一, 若杉 勇, 鈴木康男, 森 隆資, 綾田研三: 鉄と鋼, 66 (1980), S 204
- 7) 高橋忠義, 市川 冽, 工藤昌行, 島原皓一: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2198
- 8) 佐々木寛太郎, 杉谷泰夫, 小林純夫, 石村 進: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 60
- 9) 宮村 紘, 尾形昌彦, 梅岡勝之, 越智昭彦, 鈴木功夫, 大佐々哲夫, 前出弘文: 鉄と鋼, 63 (1977), S 92
- 10) 成田貴一, 野崎輝彦, 森 隆資, 綾田研三, 大西稔泰, 高木 弥: 鉄と鋼, 66 (1980), S 793
- 11) 岡本 平, 岸武勝彦, 別所 勇: 学振第 19 委資料, (1972) 9369
- 12) E. S. MIKSCHE: *Trans. AIME*, 245 (1969), p. 2069
- 13) 岡野 忍, 西村 隆, 大井 浩, 千野達吉: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2982
- 14) 杉谷泰夫, 中村正宣: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1702
- 15) 和田次康, 和田春枝: 第 61 回日本金属学会予稿集, (1967), p. 174
- 16) J. NIKURADSE: *Forshungsheft*, 361 (1933)
- 17) 平居正純, 金丸和雄, 森 久: 学振第 19 委資料, (1968) 8837
- 18) 別所 勇, 長岡 豊, 鈴木 章: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1672