

UDC 669.14-412-147 : 621.74.047

# ブルームビレットの連鋳設備と鋳片品質

森 隆 資\*

## Continous Bloom and Billet Casters and Quality of It's Product

Takasuke MORI

### 1. 結 言

我が国において、連鋳設備が本格的な生産設備として鉄鋼業に採用されはじめたのは1965年以降といえるが、わが国の年間粗鋼生産量が1億tとなつた1970年から10年間の連鋳機の普及には目覚ましいものがある。これは、電気炉メーカーを中心に鉄筋棒鋼、異型棒鋼用のビレット連鋳機のあいつぐ採用と、銑鋼一貫製鉄所におけるスラブ連鋳の適用率の増大によるところが大きい。さらにこのような連鋳指向を背景として、いつぼうではブルームおよびビレット連鋳機による高級条用材（高級仕様材）の製造体制が、設備と操業を背景とした鋳片品質の向上によつて達成されてきた。すなわち、連鋳々片に散見される、表面あるいは表層下の微細な割れ、非金属介在物の分布、中心部の成分偏析など、従来の造塊法での経験とまったく異なつた様相であらわれ、とくに高級仕様材への適用範囲に限定を与えていたが、連鋳鋼材の品質特性と連鋳設備や、操業上のデリケートな技術条件との関係が、順次定量的に解明され、理論的裏付けと共に、現場の実生産技術として定着してきた。たとえば、流体モデルによるタンディッシュや鋳型内容鋼の挙動、硫黄や鉛の残溶鋼内への添加法や鋳打ち込み法による凝固界面状況、残溶鋼の流動、凝固殻の厚さの変化及び内部の温度分布など凝固機構の解明<sup>1)~12)</sup>、熱伝導と熱ひずみ、固相線温度における凝固殻のひずみ挙動、バルジング現象、水冷と復熱による鋳片内の温度分布変化<sup>13)~21)</sup>、凝固過程における結晶の発達と化学成分及び介在物の偏析<sup>22)~25)</sup>、鋳型振動及び型内剤が表層部欠陥に与える影響などの諸研究が各社で精力的に推進され、数多くの貴重な実験結果をもとに技術的知見が確立された。さらに、連鋳機そのものの設計技術の向上とあわせて、炉外処理法、均熱分塊工程の見直しなど、前後工程を含む周辺諸技術の改善、開発も、連鋳法を今日の技術

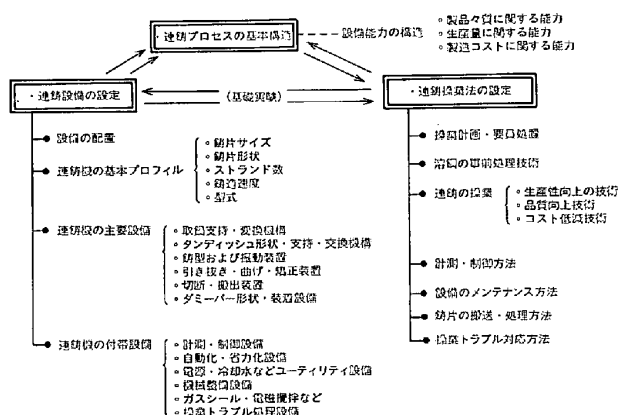


図1 連鋳機の設置と操業に関する基本設計

水準にまで発展させた大きな要因のひとつである。

連鋳工程は、造塊工程の合理化をはたすべく、今後とも溶鋼の鋳造手段のひとつとして従来の鋼塊法に代わつてますます多様化してゆくものと考えている。したがつて本報告は、これから連鋳法を採用して鋳造能力の増大、鋳造方法の転換をはかる場合を考慮し、設備と鋳片品質について現状の技術水準の概要をまとめたものである。図1は連鋳法の基本設計にかかわる検討対象範囲を図示<sup>118)</sup>したものである。基本的には、設備に具備させるべき能力の設定である。すなわち量、質、コストに関するものも同時に考慮する必要がある。具体的には、連鋳への適用鋼種、適用品質、品質の水準、生産規模、製品のロット構成および従来プロセスとのコスト評価などを取りあげる必要がある。設備の設定には、図1に示したような要素を考える必要があるが、これらの項目は、各工場固有の条件によつて考慮されるべきものが多いので、制約事項を十分に検討すべきである。特に鋳片品質は設備との関連が強く、量と共に配慮する必要がある。

昭和56年2月18日受付 (Received Feb. 18, 1981) (依頼技術資料)

\* (株)神戸製鋼所中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakoinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

## 2. 連鑄機の基本プロフィール

連鑄機の新設または改造に際して、基本構想として鑄造対象品種および生産量が企画された場合、計画に合致した設備能力とするため、連鑄機の基本プロフィールを決定することになるが、その構成要素としての鑄片サイズおよび形状、ストランド数、機長、型式、鑄造速度などについて述べる。

ブルーム、ピレット連鑄機に適用可能な品種として、導入当初は、鉄筋棒鋼、異形棒鋼を主体としていたが、現在では機械構造用鋼 (SC 鋼, 構造用合金鋼), 冷間圧造用鋼, パネ鋼, 軸受鋼, 快削鋼, ステンレス鋼などほとんどすべてのものが生産可能になっている。とくに、自動車向用素材に代表される高級特殊鋼の場合でも、表面疵, 非金属介在物, 中心偏析, 内部割れなどの品質上の諸問題点を着実に、かつ確実に解決しうる技術要素が確立され、その結果が、連鑄機の基本プロフィールの設計要素に組み込まれている。また、ロットの集約化が困難で、鑄造鋼種が多岐にわたる場合でも、継ぎ具を使用して、連々鑄を容易なものにするなどの努力が払われているが、ここでは設備上問題となる基本的な考え方を主に述べたい。

### 2.1 鑄片断面形状

鑄片断面の大きさは製品の大きさおよび品質を考慮して決定される。すなわち、鑄塊は分塊、圧延によつて鑄造組織が破壊され、伸び、絞り、衝撃値などの機械的性質を満足するものでなければならない。ピレットの場合、表 1 に示すごとく、6~10 の圧延比が一般に必要とされている。したがつて 150 mm 角以下のピレット断面では製品断面積によつて制限を受ける場合がある。高級鋼を志向する場合、十分な圧延比が要求されることは当然であり、さらに溶鋼の再酸化を防ぐためにはパウダーキャストが望ましく、サブマージドノズルを使用する必要があるため最低 150~180 mm 角の断面が必要

である。

連鑄機に分塊工程としては既設の分塊工場を活用する方法、連鑄機の最終凝固域で圧下する岸和田製鋼、淀川製鋼で採用されたインラインリダクション法、引き抜きロール通過後、再加熱帯を経て、鑄片の内外部の温度を均一化した後、圧下して所要断面ピレットを得る U. S. Steel 社で採用されたサイジングミル法などがある。

断面形状は既存の圧延工場を使用する場合には、圧延機仕様により決定される。断面形状が小さくなるほど鑄造速度は速くなりブレイクアウトの頻度が高くなると言われている<sup>26)</sup>。

既設の分塊工場を活用する場合には、分塊歩留りを考慮した矩形大断面がよいと考えられる。なぜなら、稼動中の連鑄機鑄片断面の矩形比を調べた結果<sup>27)</sup>によれば矩形比を 1.2~1.4 とした鑄片が多い。これはこの範囲では分塊圧延時に鑄片端部に生じるフィッシュテイル状のクランプ長さも、正方形断面と差が生ぜず、中心偏析の程度も理論的最终凝固域が一点に集まらないため正方形に比べて軽減されるからであろう。

いつぼう、大断面にする程、非金属介在物の浮上に対しては有利であるが、操業上トップおよびボトムクランプや異鋼種連々鑄時の継ぎ部の切捨て長さが断面積の小さい場合とほぼ同じ長さであるため、断面積が大きくなる程、切捨て量が増加して歩留りが悪くなる。また、鑄片サイズについてはできるだけ集約して、鑄片形状の変更による鑄造休止時間を減少することも必要である。この点、鑄片断面形状の決定に当たつては、最終製品サイズ、鋼材の使用目的、工場の工程能力などを総合的に勘案する必要がある。

### 2.2 ストランド数

1 基当たりのストランド数は条件によるが通常 1~8 ストランドの連鑄機が稼動している。近頃英国鉄鋼公社では 12 ストランドのものが計画されている。

ストランド数は、年間生産量によつて決定されるより

表 1 連続鑄造ピレットに加えるべき必要最小圧延比

研 究 者	必要最小圧延比 (ピレットの横断面積/製品の横断面積)
W. B. Pierce H. Kosmider, H. Neuhaus and A. Weyel J. Hofmaier B. H. C. Watess, W. H. Pritchard, A. Braybrook, and C. T. Harris P. Thomas I. M. D. Halliday G. Fenton and J. Pearson B. Tarmann G. Littlewood and W. H. Pritchard G. Fenton, G. Littlewood, and J. Zaedydt M. Cabane	<p>4 で一次品は破壊され優秀な物理的性質が得られる。 1.7 で一次品は破壊される。3.3 でブローホールは圧着する。</p> <p>6~12, スラブから板にする場合は 4~5 でよい。 5.5 で一次品は圧着され、一端が開口している収縮孔は圧縮する。 ただし炭化物の偏析は残る (高速度鋼) 4~5 で軸心の不均一部分は均一化する。 4~8 で柱状晶は破壊される。 一般に 2, 規格の厳しいものでも 6.7 で十分である。 6 で組織の均一性が得られる (高合金鋼) 9 で機械的性質, すえ込み試験その他一般性状の良好なものが得られる。 あるものは 2 でよいが規格の厳しいものは 6.7 必要</p> <p>内部を密にするためには炭素鋼, 低合金鋼で 6, ステンレス鋼, 耐熱鋼 で 8, 高速度鋼, 工具鋼で 10 必要である。</p>

もむしろ次式で示されるとおり1チャージ当たりの鑄造時間によつて決定される。

$$n = Q / (S \times 60 \times V_c \times D \times T)$$

- ここで  $n$  ; ストランド数  
 $Q$  ; 1チャージ当たりの取鍋容量 (t)  
 $S$  ; 鑄片断面積 (m<sup>2</sup>)  
 $V_c$  ; 鑄造速度 (m/min)  
 $D$  ; 鑄片密度 (t/m<sup>3</sup>)  
 $T$  ; 1チャージ鑄造時間 (h)

1チャージの鑄造時間は、溶製炉より一定のピッチで運ばれてくる溶鋼を余裕をもつて鑄造できる時間であると同時に、タンディッシュ内溶鋼の温度降下を考慮した時間として決定される必要がある。ストランド数が多くなると、当然タンディッシュ内の溶鋼流路が長くなり、整備も煩雑となる。さらに、機械設備のスペースも広くなるため、建設費は増大し、操業要員、操業費も増加する。このようにストランド数を増すことは好ましくないため、鑄片断面、鑄造速度をよく勘案してストランド数を決められるべきである。

### 2.3 機長 (溶鋼プール) の決定

未凝固部が残る鑄片にロールを圧着して鑄片を引き抜くと、鑄片内部に割れが生ずるため、鑄片引き抜き用の圧着ロール (ピンチロール) を鑄片が通過する際に鑄片中心部まで完全に、あるいは割れが生じない程度に凝固している必要がある。いいかえると鑄型メニスカスから鑄片引き抜き用圧着ロールまでの距離が、許容される溶鋼プール長さであり機長と定義されている。一旦機長が決定されると、設備上の最大鑄造速度、最大生産能力が決定されることになるため将来の操業技術の向上も考慮して機長は決定されねばならない。

溶鋼プールの長さは一般に次の凝固式より求めることができる。

$$D/2 = K\sqrt{t} = K\sqrt{L/V_c}$$

- ここで  $D$  ; 鑄片厚み (mm)  
 $K$  ; 凝固定数 (mm·min<sup>-1/2</sup>)  
 $t$  ; 完全凝固までの時間 (min)  
 $L$  ; 溶鋼プールの長さ (m)  
 $V_c$  ; 鑄造速度 (m/min)

したがつて溶鋼プールの長さは、上式から

$$L = \left(\frac{D}{2K}\right)^2 \times V_c$$

となり、溶鋼プール長さの決定は、いいかえれば凝固定数  $K$  をいかに選定するかである。

#### 2.3.1 鑄型内の凝固定数

鑄型内の凝固定数は、2次冷却の凝固定数とは基本的にその性質が異なる。すなわち鑄型内の凝固は鑄片表面から溶融したパウダーの層などを通しての鑄型内壁への熱伝導部分と、放射による部分とに大別できるが、実際には伝導と放射との微妙な混在状態である。凝固の実態

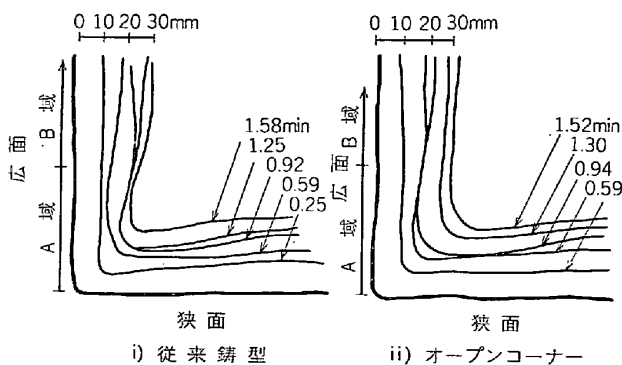


図2 鑄型内の凝固シェル厚さの変化 (硫黄添加法)

を把握するには、「鑄型内への硫黄添加実験」などにより、総合的に決定するのが望ましい。図2は硫黄添加実験の一例である<sup>28)</sup>。

メニスカス近傍では、鑄片のコーナ部も面中央部もともに凝固の進展に差が認められないが、それ以降ではコーナ部が急速に冷却されて、収縮がはげしいため、鑄型壁との接触が悪くなり、鑄型の中心部から下部にかけてコーナ部は凝固遅れを生ずる。これは鑄型コーナ部での放熱状態が鑄壁中央部と異なり、鑄片のコーナ部の放熱量が他の部分の20~30%と少ないためである。したがつてこの部分の放熱を助ける必要がある。特に大断面の鑄片をゆつくりと鑄造する場合はこの凝固遅れが鑄片内部のコーナ部割れの欠陥となり、操業上は鑄型直下のコーナ部タテ割れやブレイクアウトの原因となる。この対策として、組み立て鑄型の銅壁の下端コーナ部を切り欠き、この部分から鑄片のコーナ部にスプレー冷却を加えて、鑄型出口での凝固殻厚さを均等にすするブレイクアウト防止用オープンコーナ鑄型も開発され実用されている<sup>29)</sup>。通常鑄型内の凝固定数としては、小断面の場合  $K = 28 \sim 31 \text{ mm/min}^{1/2}$ 、大断面の場合  $K = 24 \sim 26 \text{ mm/min}^{1/2}$  程度と考えられる。

#### 2.3.2 鑄型内電磁攪拌

従来の鑄型に対し、鑄型内で電磁的に溶鋼を駆動させる方法が開発された。これによると鑄型内の凝固をある程度制御することができる。図3<sup>30)</sup>は鑄型内電磁攪拌をおこなつた場合の、鑄片コーナ部とその周辺の凝固殻の成長状況を比較したものである。鑄型内で電磁攪拌をおこなうことによつて、凝固殻の厚さがコーナ部とその

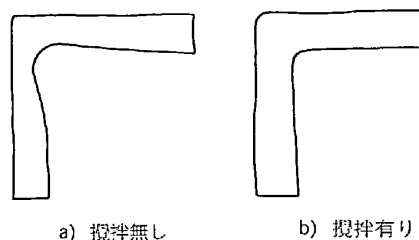


図3 電磁攪拌の有無と凝固殻の形状 (ブルーム鑄片)

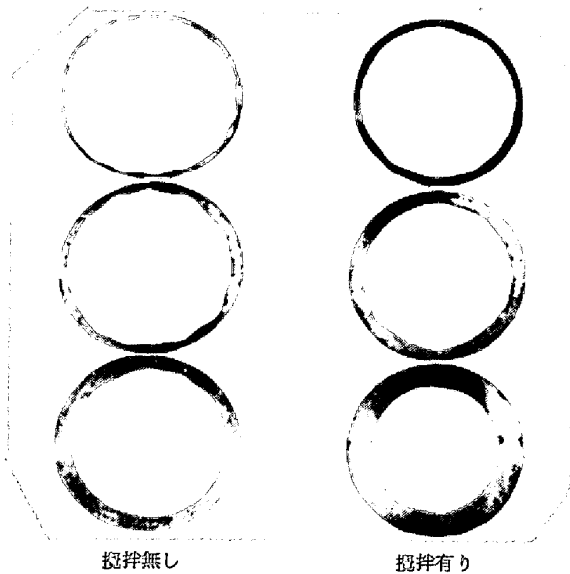


図 4 電磁攪拌の有無と凝固殻の形状 (丸ピレット)

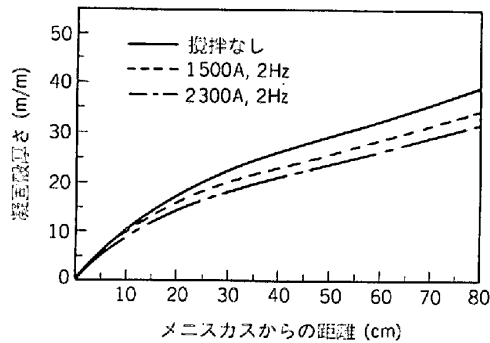


図 5 鑄型内攪拌強度と凝固殻の発達状況

周辺部で均一化している。特に、丸ピレットの場合、鑄型出口近傍で楕円形になりやすく、しかも凝固殻厚さが不均一であったが、鑄型内で溶鋼を流動させることによつて、図 4 のように均一な凝固殻と、真円の鑄片が得られている。いつぱう、鑄型内で溶鋼を攪拌する場合、凝固定数が小さくなる。

図 5<sup>80)</sup>は 300×400 断面の鑄型内で電磁攪拌をおこなつた場合の凝固殻厚さの変化を示したもので、メニスカスの下方 800 mm の場所で約 7 mm 薄くなつている。これは凝固界面のデンドライトの先端が電磁力によつて誘起された溶鋼流に切断されたものと考えられる。

### 2.3.3 2次冷却帯以降の凝固定数

2次冷却帯以降の凝固定数はいわゆる 2次冷却帯と、最終凝固域を含めた鑄片全体としての凝固定数とに分けて考える必要がある。

#### 1) 2次冷却帯の凝固定数

2次冷却帯域の凝固定数は、スプレー水の量、圧力及びノズル特性などによつて変化する。したがつて、どのような冷却特性のノズルを使つて鑄片表面温度をどのように制御するのかをあらかじめ、適用鋼種の決定と、鑄

片の品質設計をする段階で考えておく必要がある。鋼種によつては、スプレー、あるいはミスト冷却による冷却条件によつて表層部に割れを多発させるからである。

図 2 次冷却帯の凝固定数は、鑄片に直接特殊な鋏を打ち込んで調べることができる。150 mm の鋏の先端に金を封入した複合鋏を、鑄片に打ち込み調査した結果<sup>112)119)~121)</sup>によれば、この複合鋏の Ni, SCM 4 等の融解位置を知ると同時に金の ( $n \rightarrow \gamma$ ) 反応によるオートラジオグラフィから、2次冷却帯の鑄片の凝固界面の位置を正確に測定できる。このようにして凝固定数を定めることができる。また、凝固定数は鑄造条件で変わることもよく知られている。240 角曲げ型ブレード連鑄機を使つて、凝固定数におよぼす鑄造速度及び比水量の影響を調査<sup>30)</sup>している。比水量を 0.6 l/kg-steel と一定にし、鑄造速度を 1.5 m/min と増加させた場合、凝固定数は 27.5→26.0 と冷却能が減じる。いつぱう、鑄造速度を一定にし、比水量を 0.4 l/kg-steel から 0.8 l/kg-steel と変化させた場合、凝固定数は 24~23 へ変化している。凝固定数には冷却水量が大きく影響する。すなわち、鑄片の凝固速度は冷却パターンよりも、むしろ冷却水量によつて決まると考えられる。これら冷却水による鑄片の凝固殻の生長とは別に、2次冷却帯における電磁攪拌は凝固定数を減少させるが、その程度は攪拌強度の関数となる。

2) 最終凝固域をふくめた鑄片全体としての凝固定数  
連鑄機の仕様を実際にする場合、最大の問題は連鑄機全体としての凝固定数がどのようになるかである。240 mm 角曲型ブレード連鑄機を使い、鑄造速度の限界テストをおこなつている<sup>80)</sup>。2次冷却帯の前半部に冷却水を集中した場合、比水量; 0.4 l/kg-steel, 鑄造速度; 1.5 m/min ではガス切断位置で溶鋼の流出が認められ、比水量; 0.5 l/kg-steel, 鑄造速度; 1.5 m/min では溶鋼の流出は認められなかつた。いつぱう、凝固シミュレーションから鑄片の中心部が液相線温度に達するのは、比水量; 0.4 l/kg-steel, 鑄造速度; 1.5 m/min ではガス切断機の約 4 m 手前と算出された。また、状態図から中心部が固相線温度になるのは、ガスカッター位置の数メートル後方と推定され、ガス切断位置においては計算上約 60 mm 幅の固液混合域が存在することになるが、実際には 10~20 mm で流出が生じていた。さらに、鑄造速度を 1.8 m/min に上昇した場合の凝固シミュレーションでは、1.5 l/kg-steel の高比水量でも溶鋼流出は防止できないと推定された。この場合、たとえ 2次冷却帯をカッターまで延長しても溶鋼プール長さは変化しないことがわかつた。

以上述べたように、凝固定数は比水量によつて大幅に変化することも認められるが、その限度を決めるには、最終凝固域の状態が鋼種及び鑄造条件によつて変化するため、十分な精度が得られないのが実情<sup>81)</sup>である。最終

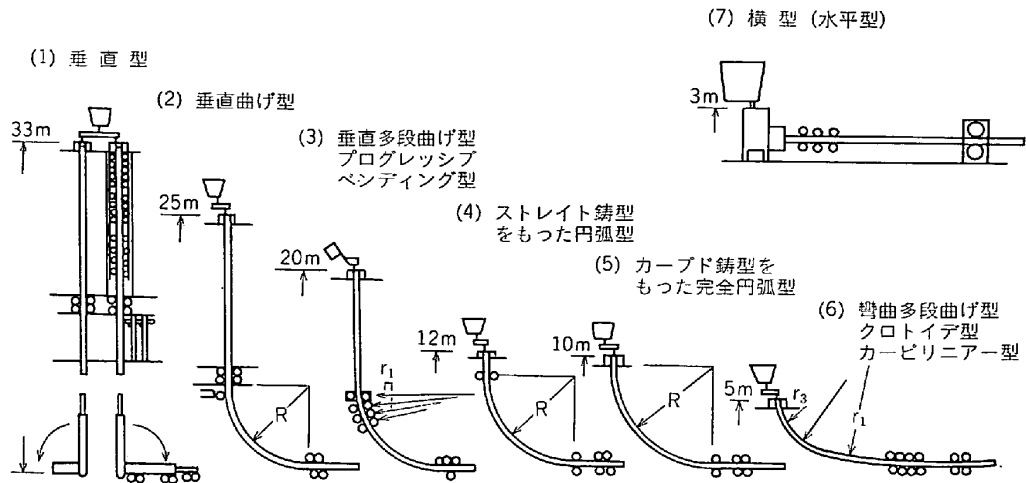


図 6 種々の設備形式

凝固域の測定には鉛添加法があるが、それとても正しい判断はむづかしい。したがって、連铸機の仕様決定に際しては、凝固定数を指示するのみでは、実操業にそわない危険性がある。一般的な値としては、比水量  $0.2 \sim 0.5$  l/kg-steel で  $K = 27 \sim 30$  mm/min<sup>-1/2</sup>,  $0.8$  l/kg-steel で  $K = 32 \sim 33$  mm/min<sup>-1/2</sup> 程度とされている。ちなみに最終凝固域のみでは  $K = 38$  mm/min<sup>-1/2</sup> 程度と考えられる。

いずれにしても、メニスカスからピンチロールまでの距離が決まれば、冷却水量をいくら増加しても、铸造速度は自と限界がある。これは、鋼の伝熱特性により律速されるためである。

#### 2.4 連铸機の型式

連铸機の型式の選択には、それぞれの設備のどの特長を重視するかを設定する必要がある。図 6 は、連铸機の種々の型式を示したもので、以下に各型式別の特長を列記する。

##### 1) 垂直型

垂直に設置されたストレイト状の铸型に铸造された鋼を、そのまま下方に引き抜く型式で、一般造塊を連続的に起こすようなものである。したがって铸片断面が  $1000$  cm<sup>2</sup> 程度以上のものでは、非金属介在物の浮上性もよい。また、铸片には溶鋼の静圧以外の応力の負荷もなく、割れ感受性の高い铸造組織でも、比較的 safely に铸造することができる。さらに、凝固も全面から均一に進行するため、成分、介在物の偏析も少ない。

一般に小断面铸片では、中心部に 2 次キャビティが発生しやすく、垂直型連铸機においても例外ではないが、最近では、電磁攪拌技術などの補助手段を活用して中心欠陥の改善もはかれるようになり高級鋼種への適用も可能になってきた。

##### 2) 垂直曲げ型 (単純円弧曲げ型)

铸込まれた铸片は、凝固終了後または凝固終了末期に

円弧に沿って曲げられ、铸片の進む方向が水平になった時点で、ふたたび直線状に矯正される型式である。垂直方向に铸込まれ、水平方向に铸片が引き出されるため、垂直型の長所を保持しつつ垂直型より機械の高さが低くなる。また、垂直型のように機械高さが機長によつて決定されない利点があるが、この型式では、曲げ部および矯正部が一点であるため、铸片内部に大きな応力が集中して発生しやすく、铸片に内部割れ欠陥を引きおこしやすい。

##### 3) 垂直多段曲げ型

铸込まれた铸片は多くの場合、未凝固の状態でも曲げられる。铸片を曲げる時には铸片内部に応力が発生するがこの型式では、応力の局所的な集中をさけるため多点による曲げと、さらに各曲げ点での曲率を少しずつ変化させて一定円弧に導く設計がなされるのが普通である。铸片の凝固完了は、この一定円弧内でおこなわれる。したがって、垂直型が铸片に与える介在物の減少効果を保持しつつ、しかも生産性も高いという長所があるため、高級鋼指向の連铸機として採用される場合が多い、本型式の場合、垂直部から曲げ部通過終了までに、铸片内部に発生する内部割れ欠陥の発生に対し、仕様作成上細心の注意を払う必要がある。

##### 4) ストレイト铸型を持つ円弧型

铸型直下で铸片を曲げて円弧状に導き、水平になった所で、矯正し、水平方向に引き出す型式で、2) の垂直曲げ型の垂直部を極端に短かくしたものである。したがって垂直部が短かくなつた分だけ機械の高さが低減される。しかし垂直型の特長である介在物の浮上効果はほとんど望むことができなくなり、高級鋼の生産には、铸造する溶鋼の事前処理を十分に実施する必要がある。また铸片を铸型直下の凝固殻の薄い領域で曲げるため、凝固界面近傍の固相域で内部割れ欠陥が発生しやすい。

連铸機としては、铸型が直線で構成されているため、

鋳型の製作および保全は非常に容易である。ただし曲げ部および矯正部は、未凝固鋳片が通過するため、両当該部のロールアライメントは常に十分な調整が必要である。

#### 5) カーブド鋳型をもつた完全円弧型

前項4)で述べたように、鋳型直下で凝固殻の薄い鋳片を曲げることは、内部品質の劣化やブレイクアウト発生の危険性からも問題が多い。この対策として、鋳型自身を円弧上に配置する方式が実用化されている。この型式のものは、鋳型が円弧に沿うため、鋳型の内部の型状は3次元的曲面となり、その加工工程は複雑となる。また浸漬ノズルを適用する場合、ノズル径と鋳片断面との関係をよく吟味し、ノズルからの吐出溶鋼が凝固殻を直撃して、ブレイクアウトを起こす原因を排除しておく必要がある。さらに曲げ内側への大型介在物の偏析を防ぐため、溶鋼の事前処理を十分におこない、鋳片断面積、曲率に適應した鋳造速度で操業する必要<sup>32)</sup>がある。しかし、鋳込まれた鋳片の経路は単純円弧に沿うため、内部割れ欠陥の防止の面およびメンテナンスの上からは有利であるとともに、連鋳機本体の高さが低く、それを収容する建屋も低く、建設費が安い。

本型式を極限化したものに回転連鋳機<sup>33)~35)</sup>がある。本型式の特長は鋳型部と、それに続くローラー部が、大径のロータに置き換えられているため高速鋳造に適する。このため、鋳片の引き抜きライン上に断熱帯あるいは均熱炉を挿入して、圧延機に直接結びつけることが可能である。

#### 6) 湾曲多段曲げ型クロトイデ、カービリニア (ローヘッド) 型

電気炉工場のように建屋の低い場所でも設置できることを目的としている。本型式の場合、曲げ型鋳型をさらに傾斜させてセットできるため、鋳造するために必要な全高は非常に低くなる。鋳込まれた鋳片は歪量が一定の割合 (カービリニア) で矯正される方法、あるいは円弧半径をすだいに大きくする (クロトイデ) 方法で矯正され水平方向に引き出される。本型式は2)~5)型式のように大きな曲げ、あるいは矯正量を必要とせず、溶鋼静圧も小さいため、パルジングも少なく、溶鋼の鋳片中心部への供給をよくすれば内部欠陥の少ない良好な鋳片組織が得られる。ただ、鋳型内に侵入した介在物は浮上の機会がほとんどないため、高級鋼種の鋳造するには十分な溶鋼処理が必要と考えられる。

#### 7) 横 (水平) 型

横型連鋳機は、垂直型と同様、鋳片に曲げあるいは矯正変形を与えないため、内部に割れの発生をきらうもの、あるいは難加工性の材料を鋳造するのに適している。しかも連鋳機は横方向に平面的に並べられているため、装置のメンテナンスは容易であり、装置自身の費用も安価であり、その建屋も特殊なものを必要としない

所に特長がある。本型式の連鋳機が1)~6)項の型式のものとは異なる点は、鋳型のオシレーション (回転連鋳を除く) に対して、鋳片を間歇的に引き抜くため、従来のオシレーションに比べ、異なつた形式の深いオシレーションマークが発生しやすい。さらに、鋳型を横向きに装置するため、鋳片の自重を鋳型で受けとめることになり、鋳型の下方部が選択的に摩耗する恐れがある。したがって、高級鋼種の小ロット、多品種生産の工程に適していると考えられる。

#### 2.5 鋳造速度

鋳造速度を高速化し、時間当たりの鋳込量を増大することは、ストランド数を少なくし、設備費の低減や省力化が実現できるが、高速化は、いつぼうでは、鋳型直下での凝固殻の厚みを薄くし、とくにコーナ部が薄く弱くなつてブレイクアウトの頻発につながり、操業が不安定となる。また、パルジングの増加によつて、内部割れが発生しやすくなり、さらに、曲げ型の場合は介在物の浮上もさまたげられ、内部品質が劣化するので、操業、品質の両面より十分検討する必要がある。図7<sup>12)</sup>は、現在報告されているブルーム・ピレット連鋳機の鋳造速度を示したものである。連鋳機の鋳造速度は今後さらに高速化するものと考えられる。そこで以下に高速鋳造時の問題について述べる。

高速鋳造では、内部割れに対する考慮が必要である。内部割れは、未凝固鋳片内の凝固界面近傍に何らかの応力が生じ、脆弱な部分が破断されて生じるものである。その発生原因は、連鋳機の型式、鋳片断面形状および鋳造速度などにより大きく異なる。

ブルーム鋳片における内部割れ発生原因は、溶鋼静圧によるパルジング、ロールのミスアライメントに起因する応力および冷却に起因する熱応力、さらに曲げ連鋳機では曲げ時と矯正時の応力など種々の応力が考えられる。理論的には、これらの応力を個々に解析し、それらの応力の総和が、割れ発生の許容限界歪みを超えているか否かを判断すればよい。しかし、実際の鋳片では側面凝固殻がこれら歪みの理論的な解析を困難にするため、簡単な計算のみによる推定はむずかしい。

次に示す一例<sup>12)</sup>は、実機において鋳片をロールで押し込んで変形させて歪みを与え、これにより、内部割れを発生させ、内部割れが発生するロールの押し込み量と

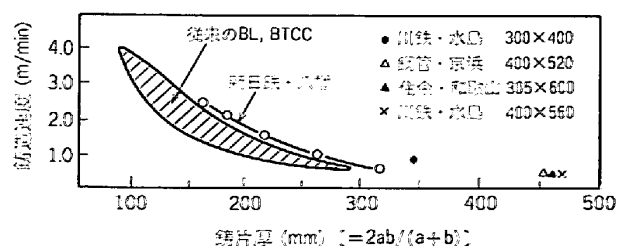


図7 鋳片 (BL・BT) サイズと引き抜き速度の関係

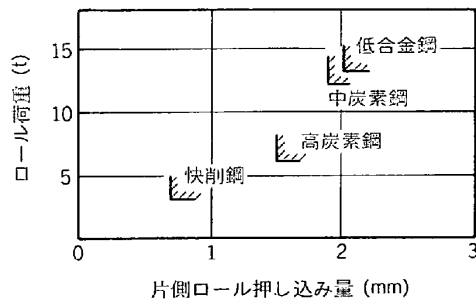


図 8 割れ発生開始時におけるロール押し込み量とロール荷重との関係

ロール荷重を直接測定し内部割れ発生限界を実測したものである。押し込みは油圧装置を用いた。押し込み量を測定するための差動変圧機とロール荷重測定用のロードセルを設備し、铸片内部に発生する歪みを算出している。また、複合鋺を用いて測定点近傍の铸片内部温度分布を測定した。鋼種は、低炭、中炭、高炭素鋼、低合金鋼及び快削鋼で、押し込みロールはメニスカス下 3.5M である。割れは押し込みロール側と受けロール側の両方に発生しているが、割れ密度は同一押し込み水準では押し込みロール側の方が若干多くなっている。割れの長さは押し込み量と直接比例せずほぼ一定である。

内部割れが発生しはじめる時点でのロール押し込み量と、ロール荷重は鋼種によって大きく異なる。この関係を図 8 に示す。割れは快削鋼が最も発生しやすく、1 mm 以下の押し込み量で発生している。ついで高炭素鋼が発生しやすく、中炭素鋼、低合金鋼と割れ難くなる。このように硫黄量が同程度なら炭素量が増すにつれて割れが発生しやすく、逆に炭素量が高くても硫黄量が低ければ割れの発生が少ないことから、硫黄量が割れ発生に対して極めて大きな影響がある。同様に割れ発生時のロール荷重も、特に快削鋼では少しのロール荷重により内部割れが認められる。従つて曲げ型連铸機のように矯

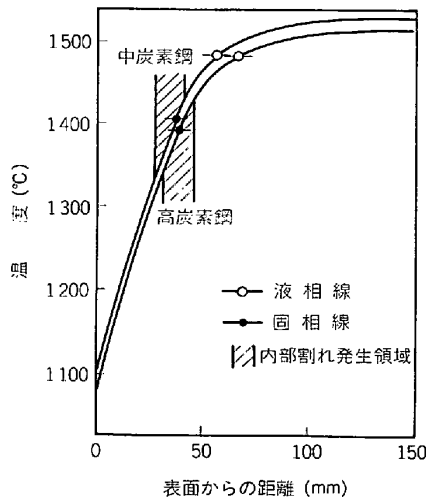


図 9 铸片の内部割れ発生場所と温度域

No.	鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
1	低炭素鋼	.20	.19	.74	.019	.016	—	.030
2	快削鋼	.17	.23	1.17	.019	.104	—	—
3	中炭素鋼	.43	.28	.75	.020	.018	—	.039
4	低合金鋼	.43	.28	.75	.020	.015	1.06	.034
5	高炭素鋼	.62	.25	.46	.020	.017	—	.023
6	高炭素クローム鋼	1.05	.27	.38	.026	.014	1.44	.018

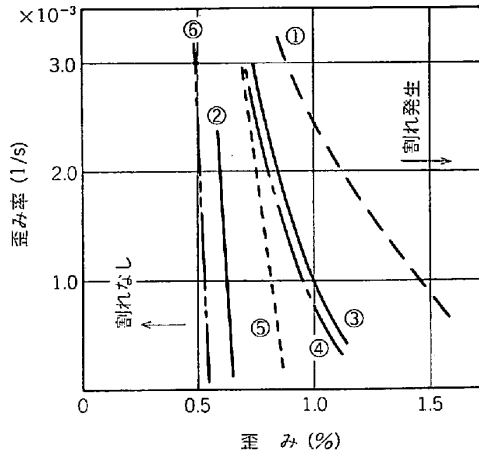


図 10 内部割れを発生する歪み-歪み速度限界

正を必要とする設備では、ロール整備の厳しい管理を必要とすることがわかる。

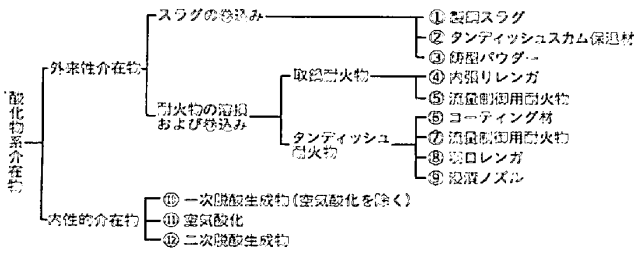
上記ロール押し込み実験と併行して铸片への複合鋺打ち込み試験と、伝熱計算とから铸片内部温度分布を知ることができる。これらの温度分布と内部割れ発生位置を比較することによって、割れ発生の温度範囲が明らかになった。図 9 は、前に述べた高炭素鋼及び中炭素鋼の割れ発生位置と温度範囲との関係で、割れはそれぞれ 1330°C から 1410°C 及び 1360°C から 1420°C の範囲に認められている<sup>36)~38)</sup>。これらの結果から、いわゆる内部割れは固相線以下で発生した可能性が強く、液相線温度近くでは割れは発生していない。もちろん割れの発生は铸造条件や炭素硫黄量等に依つて変わる。これら鋼種毎の割れ感受性<sup>39)~47)</sup>を押し込み装置を使つて試験した結果を図 10 に示す。

### 3. 铸片品質の向上

連铸適用鋼種が拡大するにつれて、ブルームピレット品質への要求は、ますます高度化してきた。従つて操業を安定させること、品質を向上させること及び連铸機独自の品質特性を巧みにその品質保証に活用する総合技術が重要である。

連铸片はブルーム铸片といえども、铸塊に比べ、その断面は相対的に小さく、冷却も急速で、側壁からのみの凝固である。したがつて介在物、内部組織、成分偏析および内部割れ感受性などが铸塊と異なつた挙動を示すが、操業要因との因果関係が定量的に把握されているため、諸欠陥の制御も十分可能になつた。

表 2 連 鑄 法 で 考 え ら れ る 酸 化 物 系 介 在 物 の 発 生 源



3.1 非金属介在物の低減

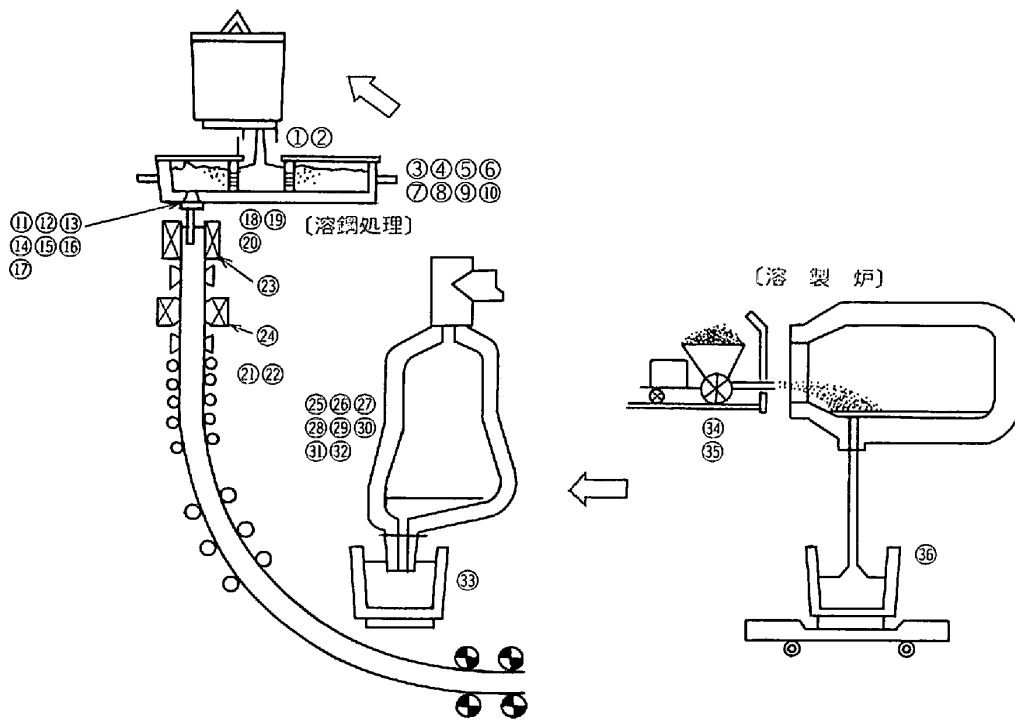
連 鑄 片 で は 凝 固 速 度 が 大 き い た め 、 非 金 属 介 在 物 の 凝 集 の 機 会 が 少 な く 、 一 般 に 大 型 介 在 物 は 少 な い 。 し か

し、一たん鑄込まれた非金属介在物は、浮上分離の面では造塊法よりも不利であるともいえる。

現在の連鑄法で考えられる酸化物系介在物の発生源を表 2 に示す<sup>48)</sup>。これらの発生源に対し、現在各事業所で採用されている最近の介在物対策の一覧を図 11 に示す<sup>49) ~ 62)</sup>。

3.2 清浄な溶鋼

連 鑄 に 適 用 さ れ る 溶 鋼 の 介 在 物 を 減 ら す 方 策 と し て 、 特 殊 アルゴンバブリング法<sup>51)59)60)</sup>、脱ガス処理法などがある。前者の中には、カルシウムをインジェクションにより溶鋼中に添加し、脱酸、脱硫及び介在物の形態制御などを行い、脱ガス処理と同程度の清浄効果を得てい



	連 鑄 工 程	溶 鋼 処 理 工 程	溶 製 工 程	
対策技術	① ロングノズル+Ar シール ② Ar シール ③ 溶鋼過熱度 ④ 溶鋼深さ ⑤ 大型タンディッシュ ⑥ タンディッシュ耐火物 ⑦ 特殊堰 ⑧ アルゴン吹き込み ⑨ タンディッシュ内ウダー ⑩ 注入初期スプラッシュ防止 ⑪ (SN+パウダー) キャスト ⑫ ミクロポア耐火物	⑬ ガス吹き込み式体型ノズル ⑭ アルミナグラファイト質 SN ⑮ 多孔 SN ⑯ SN のタイプ ⑰ 接合部のガスシール ⑱ 自動注入 ⑲ log η=0.9 のパウダー ⑳ 大断面サイズ ㉑ 垂直型連鑄機 ㉒ 15mR の ㉓ 鑄型電磁攪拌 ㉔ 2次冷却電磁攪拌	㉕ Ar バブリング ㉖ 無酸化 Ar バブリング ㉗ SAB ㉘ CAB ㉙ KAT ㉚ DH ㉛ RH ㉜ RH-SCS ㉝ 鋼レンガ材質	㉞ 石灰投射によるスラグカット ㉟ スラグボールスラグカット ㊱ Ar パーチ

図 11 非金属介在物低減技術一覧



る<sup>51)</sup>。また溶鋼処理をする取鍋の煉瓦にも、酸性よりもスピネル質の方がよいとの報告もある<sup>51)</sup>。また、RH脱ガス槽内へ非酸化性合成フラックスを添加し、中炭素鋼で酸素 20 ppm 以下の低炭素鋼を得る方法も開発されている<sup>59)</sup>。

いつばう、合金鋼の連铸化、または要求品質の高度な特殊線材などの連铸化を容易なものとするために、溶鋼加熱設備を具備した、VAD 法<sup>61)</sup>、LF 法<sup>62)</sup> および ASEA-SKF 法により積極的に鋼の清浄化、温度の均一適正化を試みるなど、高級鋼の連铸化を進めていく上で一つの方向となると考えられる。

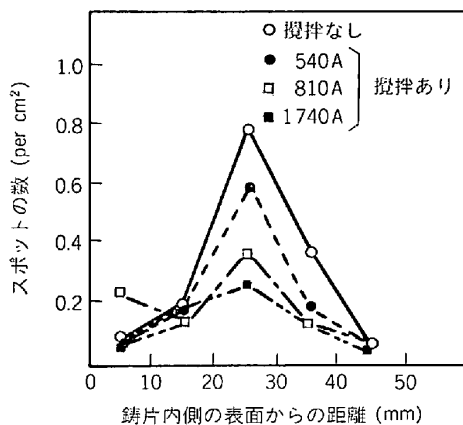


図 12 電磁攪拌による介在物分布の変化 (引き抜き速度 1.0 m/min)

### 3.3 介在物とその低減

連铸工程での介在物の起源が、トレーサーを使つて各所でおこなわれている<sup>48)49)</sup>。その結果を解析すれば、介在物起源としては浸漬ノズルの反応生成物、及びタンディッシュからの持ち込みが大半を占める。また溶鋼の取鍋～タンディッシュ間ではロングノズルまたはアルゴンガス、窒素ガスによる無酸化铸造が効果的である。タンディッシュ～铸型間では浸漬ノズルとパウダーキャストが効果的である。

### 3.4 内部性状の改善技術

連铸片の品質で問題となるのは、表層部の割れ、介在物とピンホール、中心部のポロシティと中心偏析および内部割れである。

#### (1) 铸片断面大きさと等軸晶域

铸片が小断面になるに従い急冷却されるため、柱状晶の断面内で占める割合が増加し内部欠陥の原因となる。内部の健全化を図るためには柱状晶を極力抑制する必要がある。特に、曲げ型連铸機では、铸片の曲げ内側は曲げ外側に比べて柱状晶が発達しやすい。したがって曲げ型の場合、等軸晶を多く生成させるくふうが必要である。低温注入すればよいが、実操業上困難なため、特に柱状晶の成長しやすい高炭素鋼、低炭素鋼では電磁攪拌が有効である。

#### (2) 曲げ型連铸機、铸片曲げ内側の介在物

曲げ型連铸機曲げ内側に大型介在物が偏析し、これら介在物は段削りテスト時の地疵となつて現れることが知られている。この介在物集積はノズルからの吐出流によつて生ずる下降流が弱まる位置におこるとして、2次冷却帯に電磁攪拌機を装着し曲げ内側の上昇流を強化して介在物集積の改善を図つた。結果は図 12 のとおりでサルファースポットが電磁攪拌法の採用により半減している<sup>63)64)</sup>。

### 3.5 電磁攪拌技術

従来の電磁攪拌は铸片内部組織の改善を主なねらいとして研究され<sup>69)~74)</sup>、実用化されている。その効果は等軸晶の増大、中心部ポロシティの分散による中心偏析の低減、溶鋼の洗浄作用による介在物の偏析軽減などの効果<sup>65)~68)</sup>が挙げられている。このような利点に対し、強力な攪拌は攪拌の開始点に相当する部分に炭素や硫黄などの負偏析帯(ホワイトバンド)が発生する。ホワイトバンド自体の製品への影響も解明されつつあるが、ホワイトバンドの発生を抑え<sup>75)</sup>、なお組織の改善や介在物の低減をおこなうためには、攪拌位置、攪拌力、攪拌法を正しく選定するとともに、かなり正確な制御をする必要がある。この制御域を拡げ、凝固組織、偏析及び介在物の低減などの改善を達成する方法として、最近では、組み合わせ攪拌<sup>76)~83)</sup>、多段攪拌<sup>84)85)</sup>、2段攪拌法<sup>86)</sup>などの技術が開発され、高級鋼製造はもとより普通鋼の表面疵取りなどの工程を軽減させる有力な技術として評価されるようになった。

#### (1) 铸型内攪拌 (Mold-Electromagnetic Stirring ; M-EMS)

铸型内攪拌 (M-EMS) はごく最近実用化された技術で大別して2種類の効果がある。その第一は、铸型内で攪拌するため、铸片表層部の介在物、ピンホール、或は気泡が除去されることである。図 13 は低炭 Al キルド鋼への M-EMS 適用例で、300×400 铸片から 115 mm 角に分塊した時の地疵レベルの変化を示す<sup>79)</sup>。写真 1 は Si, Al トレース鋼の M-EMS 適用铸片とその比較で、気泡の洗浄に非常に有効である<sup>87)</sup>。特に小断面ピレット

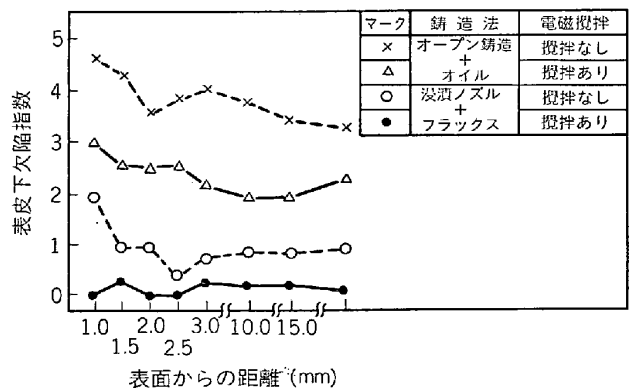
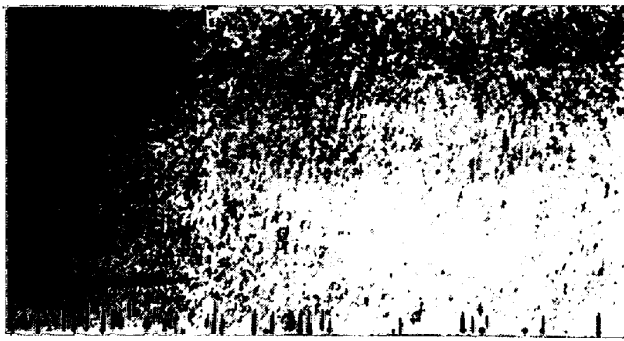
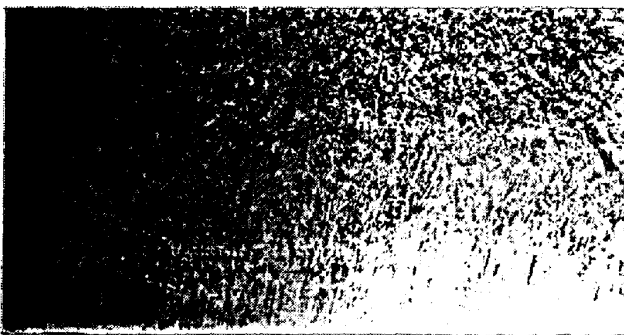


図 13 铸型内電磁攪拌による表層部欠陥の低減効果



a) 比較材



b) 鋳型内電磁攪拌の適用材  
(適正条件材)

写真 1 Si & Al % トレース鋼の鋳片横断マクロ組織

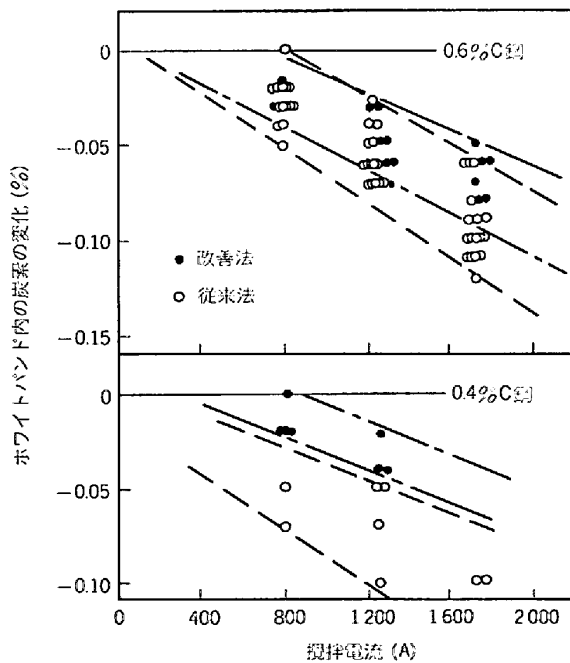


図 14 攪拌条件の改善と角偏析帯の軽減

には IRSID と ARBET グループが開発した鋳型内攪拌法が<sup>88)</sup>, 表層部の品質改善に有効である<sup>89)90)</sup>. 同法は鋳型内で攪拌するため, 溶鋼の過熱度が大きくても, 等軸晶の生成が容易である.

(2) 2次冷却帯の攪拌 (Secondary cooling zone-

-Electromagnetic Stirring)

2次冷却帯の電磁攪拌 (S-EMS) は高級線材及び高級棒鋼を製造する場合, 有効な手段であり, 各社で実用化<sup>91)-110)</sup>あるいは計画されている. いつぼう, 攪拌強度とホワイトバンドとの関係は図 14 のとおりで, 攪拌強度の増加につれてホワイトバンドは顕著になるが, 攪拌方法の改善により負偏析が低減できる<sup>95)111)112)</sup>. またステンレスにおいては柱状晶を抑え等軸品域を広げ, リジングの防止をねらう. いずれも S-EMS に関しては等軸品化とそれによつて起こる組織の改善の効果として捕えられている.

(3) 最終凝固域攪拌 (Solidification Finishing zone-Electromagnetic Stirring)

等軸晶の生成は鋳片内の凝固組織を改善するが, 凝固収縮にともなう中心偏析の生成を防ぐものでない<sup>71)</sup>. F-EMS は最終凝固域での攪拌により, 中心部への濃化溶鋼の移動を抑えた結果, 中心偏析がコントロール<sup>81)</sup>できるとしている. 図 15 はバネ鋼に M, S-EMS に加えて F-EMS を施した場合の硫黄の偏析状態である.

(4) 組み合わせ電磁攪拌

電磁攪拌はその目的によつて着装する場所及び操業法が異なるのは当然で, 各々の設置場所の特長を組み合わせると所期の品質を備えた鋳片を得ることが可能であ

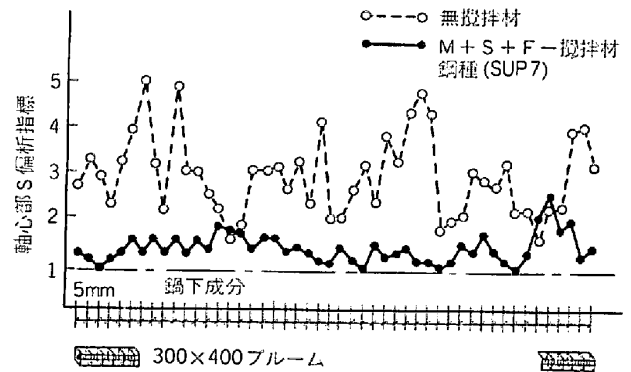


図 15 M+S+F 攪拌による軸心部 S 偏析改善効果

組み合わせEMS	電磁攪拌の主たるねらい	適用鋼種例
M-EMS 単独	介在物の低減	低炭素キルド鋼
M+S EMS あるいは M+F EMS	気泡の低減	No Si-Al鋼
	組織の均一化 微細化	中, 高炭素鋼 (低合金鋼ハネ 鋼を含む)
	介在物ならびに 中心偏析の抑制	
M+S+F EMS	攪拌強度コントロール による負偏析の抑制	
	中心偏析の効果的 低減	特殊高炭素鋼

図 16 組み合わせ電磁攪拌のねらいと適用例

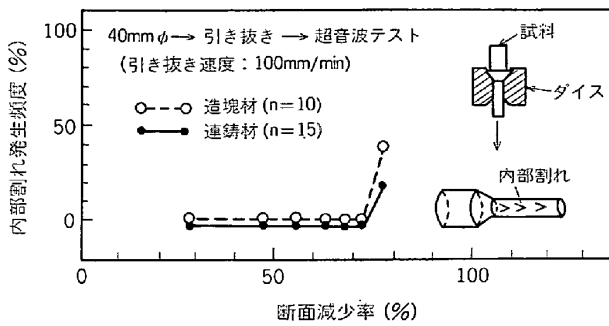


図 17 S48C 材の引き抜き試験

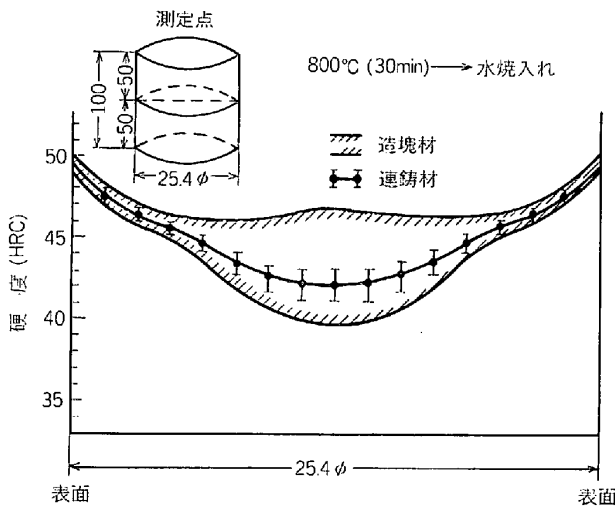


図 18 SCM22 の焼入試験

る。図 16 は使用目的別に、適用鋼種と攪拌手段の組み合わせをまとめたものである<sup>82)</sup>。

### 3.6 連铸機の製品品質

連铸機の製品特性については非常に多くの報告がなされている<sup>113)~117)</sup>。図 17 および図 18<sup>84)</sup>は 300×400 mm ブルームから圧延した 40 mmφS 48C 棒鋼の引き抜き加工試験、及び 25.4 mmφ SCM 22 の SAC 焼入性試験をおこなった結果である。引き抜き加工試験では連铸材は造塊材と同様に内部割れ発生限界加工率は高い水準にあり、SAC 焼入性試験では連铸材は造塊材に比べ硬度のばらつきが極めて少ない。

## 4. 結 言

連铸法が実用化されて 1/4 世紀、特にブルーム・ピレット連铸機による条用素材の生産量は 1970 年代初頭より飛躍的な増量を遂げ、連铸可能鋼種を拡大してきた。

現在では、造塊法に替って連铸法が鋼の代表的な造塊手段としてその地位をさらに確固たるものとしつつある。これは、連铸設備そのものが操業および品質の両面における技術改善、開発とその前後工程をふくむ周辺諸技術の開発によつてささえられ、連铸本来の均質性、清浄性及び高い生産性が発揮できるようになったためであ

る。

連铸法は、省エネ化等の新たな期待に答えて、さらにその可能性を追求されるプロセスで、今後解決すべき技術を駆使して、高級鋼をピレットサイズで連铸化する技術確立するなど、品質面はもちろん、設備投資面、操業コスト面、生産性の面でさらに有利で信頼性のたかいプロセスにする技術的開発がなされるべきであろう。

## 文 献

- 1) J. E. LAIT, J. K. BRIMACOMBE, and F. WEINBERG: *Ironmaking and Steelmaking* (1974) 2, p. 90
- 2) A. GRILL, K. SORIMACHI, and J. K. BRIMACOMBE: *Met. Trans 7B June* (1976), p. 177
- 3) J. K. BRIMACOMBE: *Canadian Metallurgical Quarterly*, 15 (1976) 2, p. 163
- 4) C. R. TAYLOR: *Met. Trans. 6B Sep.* (1975), p. 359
- 5) R. ALBERNY: *Int. Symp. Cast Solidification Steel* (1977), p. 278
- 6) J. E. LAIT, J. K. BRIMACOMBE, F. WEINBERG, and F. C. MUTTITT: *Open Hearth Proceedings* 56 (1973), p. 269
- 7) S. N. SINGH and K. E. BLAZEK: *J. Metals Oct.* (1974), p. 17
- 8) A. GRILL and J. K. BRIMACOMBE: *Ironmaking and Steelmaking* (1976) 2, p. 76
- 9) K. CRIFF and R. J. DAIN: *JISI March* (1967), p. 278
- 10) Yu. A. SAMOILOVICH, V. A. GORYAINOV, Z. K. KAVAKOV, A. G. PODORVANOV, and P. PERMINOV: *Stal*, (1976, 12), p. 1078
- 11) S. K. MORTON and F. WEINBERG: *JISI Jan.* (1973), p. 13
- 12) E. W. BELL, J. C. COWAN, and L. E. GAST: *J. Amen. Oil Chem.*, 49 Oct. (1972), p. 552
- 13) A. GRILL, J. K. BRIMACOMBE, and F. WEINBERG: *Ironmaking and Steelmaking* (1976) 1, p. 38
- 14) A. GRILL: *Ironmaking and Steelmaking* (1979) 2, p. 62
- 15) K. SORIMACHI and J. K. BRIMACOMBE: *Ironmaking and Steelmaking* (1977) 4, p. 240
- 16) K. SCHWERDTFEGER: *Int. Symp. Cast Solidification Steel* (1977), p. 62
- 17) R. SIEGEL: *Int. J. Heat Mass Transfer* 21 (1978), p. 1421
- 18) W. T. LANKFORD, Jr.: *Met Trans* 3 June (1972), p. 1331
- 19) J. FLIIGGE, K. HAGEN, and P. HAMMERSCHMID: *Arch. Eisenhüttenw.* 48 (1977) 2, p. 77
- 20) H. Von ENDE and G. VOGT: *JISI Dec.* (1972), p. 889
- 21) R. SCHOEFFMANN: *Iron and Steel Eng.*, Aug. (1972), p. 25

- 22) F. W. IRWIN and R. J. MILBOURNE: J. Metals Sep. (1970), p. 30
- 23) N. T. MILLS and L. F. BARNHARDT: J. Metals Nov. (1971), p. 37
- 24) R. ALBERNY, L. BACKER, and J. P. BIRAT: Elec Furn. Proceedings (1973), p. 237
- 25) S. KOLLBERG: Iron and Steel Eng. March (1980), p. 46
- 26) Iron & Steel Inst. Spec. Report "A Study of continuous Casting" (1977), p. 52
- 27) 連続鑄造作業調査表 (鉄鋼連盟編) (1980) 1 月 p. 38
- 28) 成田貴一, 森 隆資, 綾田研三: 神戸製鋼技報, 29(1979), p. 65
- 29) 特公昭 53-42287
- 30) 神戸製鋼・神戸, 第 65 回製鋼部会
- 31) 森 隆資, 綾田研三, 成田貴一: 鉄と鋼, 60 (1974), 11, p. 23
- 32) 平岡照祥, 松永 久, 大橋徹郎, 広本 健: 製鉄研究 (1978) 249, p. 79
- 33) 木村智明, 遠藤宗宏, 西野 忠, 新山英輔, 堀口 穰: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 194
- 34) 山本美佐夫, 香取英俊, 木村智明, 遠藤宗宏, 二木隆夫, 矢葺 隆: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 195
- 35) 木村智明: 第 69, 70 回西山記念講座, p. 353
- 36) 成田貴一, 森 隆資, 野崎輝彦, 宮崎 純: 鉄と鋼, 66 (1980), S 806
- 37) 鈴木洋夫, 山本広一, 井上 泰, 大野恭私, 野田直孝: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 803
- 38) 今村 淳 鈴木洋夫, 宮崎武志: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 804
- 39) 鈴木洋夫, 西村 哲, 中村 泰: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 805
- 40) 宮崎 純, 森 隆資, 成田貴一: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 758
- 41) 北岡英就, 木下勝雄, 江見俊彦, 橋 林三, 垣生泰生: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 811
- 42) 杉谷泰夫, 中村正宣, 川崎守夫, 河嶋寿一: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 193
- 43) 加藤一郎, 森田喜保, 河嶋寿一, 中村正宣: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 192
- 44) 加藤一郎, 杉谷泰夫, 中村正宣: 鉄と鋼, 65 (1979) 11, S 713
- 45) 藤井博務, 大橋徹郎, 広本 健: 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S 484
- 46) 児玉英世, 新山英輔, 堀口 穰: 鉄と鋼, 62 (1976) 2, A 111
- 47) 鈴木洋夫, 山口重裕, 松宮 徹, 速水哲博: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 150
- 48) 耐火物部会 耐 26-1: 新日鉄
- 49) 山田桂三, 渡部十四雄, 福田和郎, 藤山 環, 田代時夫: 鉄と鋼, 66 (1980) 2, A 25
- 50) 森 隆資, 綾田研三, 大西稔泰, 高木 弥, 鉄と鋼, 66 (1980) 2, A 29
- 51) 小野修二郎, 前出弘文, 重住忠義, 吉井良昌: 鉄と鋼, 66 (1980) 2, A 33
- 52) 児玉正範, 上杉活之, 上田徹雄, 岡野 忍, 鉄と鋼, 66 (1980) 2, A 37
- 53) 梨和 甫, 吉田圭治, 森 明義, 友野 宏, 木村和成: 鉄と鋼, 66 (1980) 2, A 41
- 54) 新日鉄・釜石: 第 71 回製鋼部会
- 55) 飯田義治, 岡野 忍, 児玉正範, 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 148
- 56) 石黒守幸: 実用新案 S 54-33940
- 57) 吾嬭製鋼・仙台: 第 71 回製鋼部会
- 58) 成田貴一, 森 隆資, 小島勢一, 大西稔泰, 喜多村実, 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 789
- 59) 神戸製鋼・神戸: 第 75 回製鋼部会
- 60) 新日鉄・八幡: 第 71 回製鋼部会
- 61) 住友金属・小倉: 第 75 回製鋼部会
- 62) 吾嬭製鋼・仙台第 61 回製鋼部会
- 63) 成田貴一, 森 隆資, 綾田研三, 宮崎 純, 藤巻正憲, 宮下隆夫: 鉄と鋼, 63 (1977) 4, S 122
- 64) 成田貴一, 森 隆資, 綾田研三, 宮下隆夫, 本城孟: 鉄と鋼, 65 (1979) 11, S 707
- 65) 角井 洵, 古河洋夫, 川田則幸, 秋田秀喜, 藤川安生, 佐々木邦政: 三菱重工技法, 16 (1979) 3
- 66) 大岡耕之, 竹内英磨, 池原康充, 若松道生: 鉄と鋼, 62 (1976) 4, S 112
- 67) 田代 清, 伊藤秀雄, 佐藤信吾, 岡島忠治, 前出弘文: 鉄と鋼, 62 (1976) 11, S 463
- 68) 竹内英磨, 池原康充, 武田雅男, 柳井隆司, 松村省吾, 駒野忠昭: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 649
- 69) 水上秀昭, 小松政美, 川上公成: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 800
- 70) 杉谷泰夫, 小林純夫, 吉原正裕, 石村 進: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 801
- 71) 新日鉄・室蘭: 第 73 回製鋼部会
- 72) 長谷川拓二郎, 鈴木功夫, 岡崎巳次, 菅原 健, 吉井良昌, 前出弘文: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 207
- 73) 杉谷泰夫: 学振 19 委凝固部会資料 (1979 年 2 月)
- 74) H. S. MARR: Iron & Steel Intern., 52 (1979) 1
- 75) 浅井滋生, 西尾信幸, 鞭 巖: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 202
- 76) 小島勢一, 大西稔泰, 成田貴一, 森 隆資: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 789
- 77) 吉井賢太, 三木克巳, 稲崎精二, 宮島一徳: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 790
- 78) 成田貴一, 森 隆資, 野崎輝彦, 大西稔泰, 鈴木康男: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 741
- 79) 大西稔泰, 江波戸紘一, 高木 弥, 塩飽 潔, 太田安彦, 花園 猛: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 792
- 80) 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) 11, S 793
- 81) 大西稔泰, 高木 弥, 江波戸紘一, 柿原与志夫, 若杉 勇, 鈴木康夫, 森 隆資, 綾田研三: 鉄と鋼, 66 (1980) 11 S 794
- 82) 大西稔泰, 高木 弥, 柿原与志夫, 若杉 勇, 鈴木康夫, 森 隆資, 綾田研三: 鉄と鋼, 66 (1980)

- 11, S 795
- 83) 竹内栄一, 藤井博務, 大橋徹郎, 木村一茂, 高島靖, 山広実留: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 796
- 84) 川上公成, 王応雄一郎, 菅野道夫, 山中 康, 65 (1979) 4, S 206
- 85) 住友金属・小倉: 第 74 回製鋼部会
- 86) 新日鉄・室蘭: 第 73 回製鋼部会
- 87) T. MORI, K. AYATA, and K. NARITA: A. T. S. International Conference (1980) 10 PARIS
- 88) R. ALBERNY, L. ANGEL, and J. BIRAT: Trans. AIME (1978) 16/20 April
- 89) 楯 昌久: 第 69 回西山記念技術講座 p. 202
- 90) 吉村誠恒, 鈴木正四郎, 高川 繁, 上野英生: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 802
- 91) 宮村 紘, 尾形昌彦, 梅村育寛: 鉄と鋼63(1977) 4, S 92
- 92) 金子信義, 宮村 紘, 古加成典: 鉄と鋼64(1978) 4, S 205
- 93) 打田安成, 武居博道: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 205
- 94) 川鉄・水島: 第 75 回製鋼部会
- 95) 大西稔泰, 高木 弥, 江波戸紘一, 鈴木康夫, 森隆資, 綾田研三: 鉄と鋼, 66 (1980) S 204
- 96) 足立隆彦, 川見 明, 田中哲三, 萩原利明: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 205
- 97) 飯田義治, 児玉正範, 加藤安功, 岡野 忍, 新庄豊, 森 勝彦: 鉄と鋼66 (1980) 4, S 799
- 98) 武田雅男, 柳井隆司: 製鉄研究, 294 (1978) 6, p. 32
- 99) 小野秋男, 前出弘文, 重住忠義, 鈴木功夫, 吉井良昌, 菅原 健: 鉄と鋼, 65 (1979) 11, S 715
- 100) 新日鉄・室蘭: 第 73 回製鋼部会
- 101) 田代 清, 伊藤幸良, 前出弘文, 高尾滋良: 鉄と鋼, 63 (1977) 4, S 126
- 102) 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) 4, S 92
- 103) 住友金属, 小倉: 第 71 回製鋼部会
- 104) 加藤正一, 吉田英雄: 鉄と鋼, 63 (1977) p. 1681
- 105) 竹内英磨, 池原康允, 松井秀太, 松村省吾: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1227
- 106) 山田桂三, 渡部十四雄, 福田和郎, 藤山 環, 田代時夫: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 218
- 107) 伊藤幸良, 前出弘文, 岡島忠治: 学振 19 委凝固部会資料( 年 月) 14-1-3
- 108) 新日鉄・八幡: 第 71 回製鋼部会
- 109) 大平洋金属・八戸: 第 58 回製鋼部会
- 110) 大同特殊, 渋川: 第 56 回製鋼部会
- 111) 成田貴一, 森 隆資, 綾田研三, 宮崎 純, 藤巻正憲: 鉄と鋼64 (1978) 4, S 152
- 112) 神鋼・尼崎・中研: 第 71 回製鋼部会
- 113) 鈴木功夫, 前出弘文, 伊藤幸良: 63 th National Open Hearth & Basic Oxygen Conference (1980-3)
- 114) 新日鉄, 室蘭: 第 60 回特殊鋼部会
- 115) 住友金属・小倉: 第 74 回製鋼部会
- 116) 中川康弘, 中井一吉, 浜口 陽, 片山 進, 佐山泰弘: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 237
- 117) 林田 昊, 宮村 紘, 木元 弘, 尾形昌彦, 岩本明智, 久富良一: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 272
- 118) 大西稔泰: 第 69, 70 回西山記念技術講座 p. 36
- 119) 森 隆資, 長岡 豊, 綾田研三, 副島利行: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 1033
- 120) 神戸製鋼・中研: 第 65 回計測部会
- 121) 神戸製鋼・中研・神戸: 第 73 回製鋼部会
- 122) 楯 昌久: 第 69, 70 回西山記念技術講座 p. 161