

連続铸造設備の新しい電極式铸型内溶鋼

レベル計の開発

今田 紘*・仁村 嘉孝*・横山 秀樹*²鈴木 康夫*³・飯田 晋三*⁴・尾崎 幸雄*³

A New Electrode-type Mold Level Meter in Continuous Casting Machines

Hiroshi IMADA, Yoshitaka NIMURA, Hideki YOKOYAMA

Yasuo SUZUKI, Shinzo IIDA, and Yukio OZAKI

Synopsis :

This paper is concerned with a new electrode-type mold level meter to be used in the mold of continuous casting machines, and with a mold level control system. The principle of this meter is as follows: the electric resistance of flux on molten steel in the mold is detected by the electrode of the level meter. The displacement of the electrode is controlled in such a way that the resistance, which is equivalent to the distance between the electrode and the molten steel surface, has a constant value. Hence the electrode smoothly follows the movement of the free surface of the molten steel. Therefore the mold level can be detected by measuring the electrode displacement. This level control system was analyzed through the use of a simulation model.

The performance of the electrode-type level meter is as follows: (1) maximum range of use: 500 mm, (2) maximum follow-up control speed: 70 mm/s and (3) response time: 1 sec.

Even in the case of applying the electro-magnetic stirring in the mold, it has been confirmed that the electrode-type level meter can perform so well as to keep the change of molten steel level within ± 5 mm under the automatic operation.

1. 緒 言

連続铸造設備(以下、連铸機と呼ぶ)が1955年に日本で最初に稼働して以来、連铸機の有用性が認められ、いまや、転炉一連続铸造法が製鋼法の主流となっている。連続铸造技術が普遍化してくるにつれて、冶金学的な研究開発はもちろんのこと、最近では、省エネルギー、省力、歩留り向上の限界への挑戦を図るために計測制御技術の研究開発が活発に進められている。とくに最近では高級鋼の連铸化が指向されており、一部の鋼種を除いてほとんどのものが連铸化されている。連铸鋼種の拡大は溶銑処理技術、自動铸込み技術、2次冷却水制御技術や電磁攪拌技術などの一連の連続铸造技術の結集により始めて可能になるものであり、計測制御技術の果たす役割は非常に大きい。

自動铸込み技術の開発にあたって最大の難点は溶鋼レベル計であつた。従来、溶鋼レベル計として実用化され

たものには、(1) γ 線式レベル計、(2) 熱電対式レベル計¹⁾²⁾、(3) 渦電流式レベル計³⁾、(4) 電磁測温式レベル計⁴⁾などが報告されている。これらのレベル計にはいずれも一長一短があり、とくに最近の高級鋼の連铸化を指向した铸型内電磁攪拌技術と共用できるレベル計は少ない。

筆者らは、以上の状況に対処するために铸型内電磁攪拌技術と共用できる溶鋼レベル計として電極追従方式に基づく铸型内溶鋼レベル計を開発した。本報告では、(1) 電極式溶鋼レベル計の原理と構成、(2) 自動铸込みシステムの概要、(3) 制御システムの制御性の検討、(4) 電磁攪拌の影響、(5) 操業結果について述べる。

2. 電極式溶鋼レベル計の原理

電極式レベル計は、従来より、いろいろな分野で利用されているが、いずれの場合も電極と溶鋼との接触/非接触により電氣的導通/非導通状態を ON-OFF 的に検

Trans. ISIJ Vol. 22 (1982) No. 12 に掲載 昭和 56 年 12 月 7 日受付 (Received Dec. 7, 1981)

* (株)神戸製鋼所浅田研究所 (Asada Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 53-3 Aza-maruyama Gomo Nada-ku Kobe 657)

*² (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd.)

*⁴ (株)神戸製鋼所機械事業部 (Machinery Division, Kobe Steel, Ltd.)

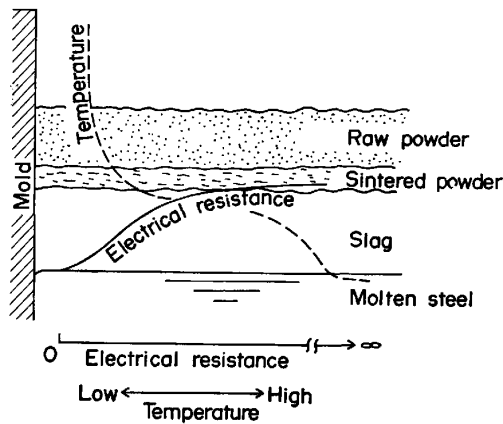


Fig. 1. Diagram illustrating the structure and the electrical characteristic of molten flux in a mold.

知しレベルを測定する方法である⁵⁾。

本方式は、連鋳機の鋳型内溶鋼レベルの検出を目的としており、測定原理として鋳型内に添加されているパウダーの電気特性を利用している。したがって、従来のON-OFF式レベル計と異なり、連続的に溶鋼レベル変化を検出することができる。

2.1 鋳型内溶融パウダーの電気的特性

鋳型内の溶鋼表面には、保温、2次酸化防止、介在物の吸収、鋳型-鋳片間の潤滑などを兼ねてパウダーが添加されている。パウダーは自動供給装置により、鋳型内へ均一に添加され、通常5~50mmの厚さで溶鋼表面を覆っている。溶鋼表面上のパウダーの状態を Fig. 1により示す。添加されたパウダーは高温の溶鋼に接しているために、溶鋼表面直上では、溶融状態のスラグ層、その上では温度がやや低くなるので、溶融しないで焼結状態になった焼結層、最上端では、ほとんど添加されたままの状態の生パウダー層の層構造になっている。

各層の境界は、明確には区別できず、パウダーの厚みにより層構造も変化し、極端に薄くなるとスラグ層だけになることもある。ここで、注目されるのは、スラグ層内の電気的特性であり、焼結層および生パウダー層は関係しない。Fig. 1に模式的に3層構造になったときのパウダーの温度分布および電気抵抗分布を示している。とくに、スラグ層内では、パウダーが溶融状態の導電体になっているので、電気抵抗の変化は顕著である。すなわち、溶鋼表面近傍では抵抗は低いがスラグ層と焼結層の境界近傍から急激に抵抗値は大きくなる。スラグ層内の電気抵抗の実測例を溶鋼表面からの距離の関数として、Fig. 2に示す。スラグ層は、熱伝導率が低い層内の温度勾配が大きく、溶鋼表面から離れるに従って、電気抵抗は指数関数的に増加する。Fig. 2により示した電気抵抗特性は SiO₂ および CaO を主成分とするパウダーの測定例であり、この特性はパウダーの成分が変わ

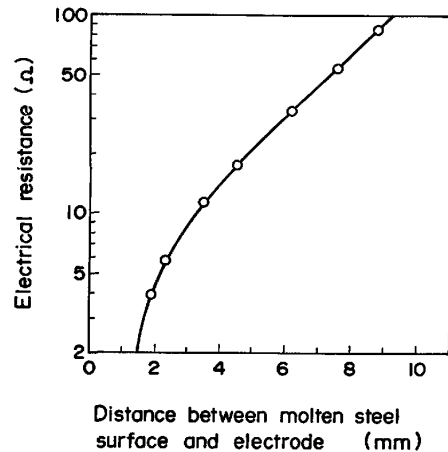


Fig. 2. Electrical resistance of molten flux plotted against distance between molten steel surface and electrode.

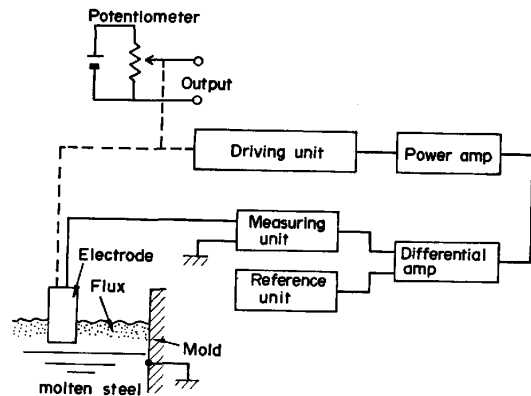


Fig. 3. Block diagram of the electrode-type level meter.

ると当然変化するものである。しかしながら、溶鋼面からの距離とパウダーの電気抵抗との関係が指数関数的に変化するという点において同様なので、以下に述べる測定原理から、実用的にはパウダーの相違は無視してもさしつかえない。

2.2 測定原理

鋳型内溶鋼レベル計として従来より電極式レベル計についてのいくつかの提案がなされている⁵⁾。しかしいずれの場合も、電極と溶鋼との接触をON-OFF的に検知する方法である。これらの方法は、多くの問題点を有しており、いずれも実用化されていない。本方式は、見かけは従来方法と同等であるが、原理的には全く異なっている。以下に、本方式の測定原理について述べる。

電極式レベル計の原理図を Fig. 3に示す。電極は、溶鋼表面から少し離れたスラグ層内に浸漬されており、この電極によりスラグ-溶鋼-鋳型間の電気抵抗を測定する。溶鋼および鋳型の電気抵抗は、スラグ層の電気抵抗に比べて非常に小さく無視できるので、実質的にはスラ

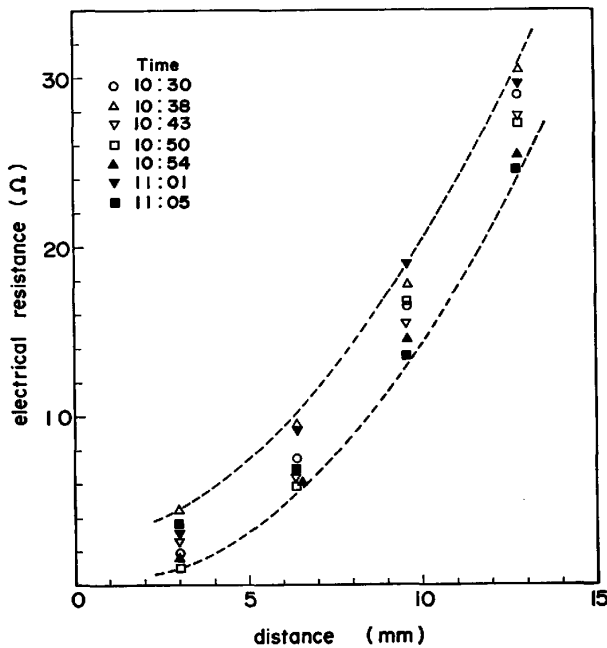


Fig. 4. Electrical resistance fluctuation of powder.

グ層の電気抵抗を測定していることになる。一方、Fig. 2に示した抵抗特性曲線を利用して電極を設定する位置をきめ、その位置での電気抵抗を設定抵抗として与える。設定抵抗と実測した抵抗値との差は、増幅器を経て、電極駆動用モータに加えられ、サーボ機構により、電極位置と溶鋼表面との距離が一定になるように制御される。この電極の位置を電極駆動機構に連動させたポテンショメータで読み取り、溶鋼レベル位置を検出する。電気抵抗測定回路の分解能は 0.1Ω 以上、75 mm 振幅のステップ入力に対する応答特性はムダ時間 0.05 秒、90% 応答は 0.66 秒である。また 10 mm 振幅の正弦波入力に対する周波数応答特性として振幅は 0.8 Hz まで応答し、位相は 0.5 Hz まで平坦である。上記の特性により、本レベル計は鋳型内容鋼レベル計として十分な特性を有していることがわかる。

この測定原理より明らかのように、電極と溶鋼表面との距離は常に一定になるように制御されているので、溶鋼レベル変動になめらかに追従できる。

上述のごとく、本方式は溶鋼表面上に添加されたパウダーの電気抵抗特性を利用しているのでこの特性が常に安定しているかどうかの問題である。まず最初に問題になるのはパウダーの種類が変化したときであるが、本レベル計は電気抵抗測定機能を有しており、使用するパウダーに対して Fig. 2 と同様な抵抗特性曲線を簡単に測定できる。その結果からパウダーの種類に応じて設定抵抗を変更することによりこの問題は解決できる。パウダーの時間経過による電気抵抗の変化を測定した例をFig.

4により示す。この図は約 30 min にわたって電気抵抗特性がどのように変化するかを示している。各データは数分間隔で測定した。この図からわかるように設定抵抗値に対して時間的に 2~3 mm のレベル変動が生じることになるが溶鋼レベル変動を ± 5 mm 以内に制御することを目的にしているので、この程度の特曲線の変化は問題ない。

一方もつと深刻な問題はパウダー層の厚さが極端に薄くなつたときに生じる。この場合には、レベル計がハンチングを起こす。パウダ厚さが急激に変化したときのレベル計の振舞いについては第 4 章で検討する。

3. レベル計の構成

電極式レベル計は Fig. 3 に示すように電極、電気抵抗測定回路、サーボ機構および電極昇降装置により構成されている。以下に各部について詳述する。

3.1 電 極

本装置の実用化にあたって最も困難な点は、電極材料の選定である。電極は常に 1500°C 以上にも達する熔融状態のスラグ層に接触しているので、まず、耐熱性が要求される。次に電極と熔融スラグ、または、地金との濡れ性が問題になる。このため電極材料としては、ほとんどの金属材料は使用できない。たとえば、チタンのように融点の非常に高い材料を使用しても、パウダーが電極の周囲にダンゴ状に付着して、すぐに測定不能になる。すなわち、電極に付着したスラグは、電極に高抵抗の物質を皮覆したと同等の作用をする。その結果、正確な電気抵抗測定ができなくなりレベル計が動作不良を起こす。

電極材料の選定にあたって、種々の材質を対象にした実験を行つた結果、カーボン系の材質が最適であることが判明した。カーボン系材質は高温の酸化雰囲気では消耗が激しく、スラグ表面の空気と接触する場所でくびれが生じる。たとえば非断熱性パウダーを用いた場合はパウダー表面は赤熱化し非常に高温になるので数チャージで 1~2 mm の損耗が生じる。しかしながら断熱性パウダーを使用する場合は、空気と接触している部分の温度が低いのでくびれはほとんど起こらない。くびれを防止するためには、電極表面に耐熱性材料をコーティングするなどの処理をすることが有効である。

3.2 電気抵抗測定回路

電極-スラグ層-溶鋼-鋳型間の電気抵抗を測定する回路を Fig. 5 で示す。電極-鋳型間に 500 Hz の定電流回路を接続し、抵抗測定を行つている。直列に接続された各抵抗要素のうち、スラグ層以外の抵抗要素は、ほとん

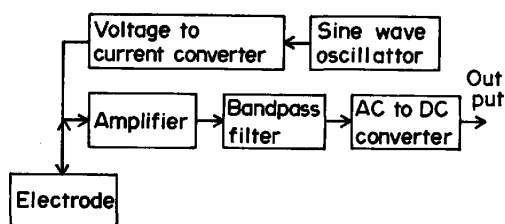


Fig. 5. Block diagram of the resistance measuring unit.

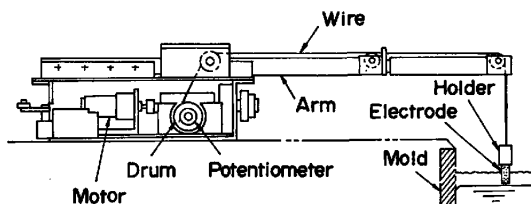


Fig. 6. Side-view of the electrode-type level meter.

ど無視できる大きさである。溶鋼レベル計は、鋳型内電磁攪拌をかけた状態で使用されるので、低周波誘導ノイズおよび商用周波数によるノイズを避けるために、測定周波数として 500 Hz が選ばれ、バンドパスフィルタを通して不要な周波数帯域の信号を除去できるように対ノイズ対策を施している。レベル計出力は上記フィルタおよび AC-DC 変換回路を通して直流信号に変換され、設定抵抗値との比較回路に加えられる。

3.3 サーボ機構

抵抗測定回路により測定した電極-鋳型間の抵抗値と設定抵抗値との差信号を差動増幅器および電力増幅器により増幅し、昇降装置の駆動モータに入力する。このサーボ系による電極の最大追従速度は 70 mm/s である。この最大追従速度は、スライドノズル全開のときの溶鋼流量鋳型断面積、鋳造速度等の関係から決められた。

3.4 電極昇降装置

サーボ機構により電極昇降装置の駆動モータを動か

し、ワイヤを経て電極を昇降させる。レベル計の概観図を Fig. 6 に示す。電極位置はワイヤ巻き取りドラムに直結したポテンショメータにより検出する。電極の支持にワイヤを用いることにより、測定レンジの拡大が容易にできる。電極の上昇はドラムによりワイヤを巻き取ることで行い。一方、下降時にはワイヤがドラムから繰り出され、電極は自重によつて降下する。

昇降装置には電極の移動範囲を設定するための上下リミットスイッチおよびワイヤ巻き取り時の異常によるワイヤ切断や下降時に電極が何かに引つ掛かつたとき余分なワイヤの繰り出しを避けるための張力リミットスイッチを備えている。

4. 自動鋳造システム

連鋳機の自動鋳込みシステムを Fig. 7 で示す。全体のシステムは、(1) タンディッシュ内の溶鋼重量制御および (2) 鋳型内の溶鋼レベル制御の 2 段階に分かれている。前者は、ロードセルにより溶鋼重量を測定し、スライドノズルの油圧ユニットにフィードバックして溶鋼重量変動を ±0.5 t に制御している。後者の場合、溶鋼レベル計の出力をスライドノズルの油圧ユニットにフィードバックしてスライドノズルの開度制御を行い、鋳型内溶鋼レベル制御を行つている。

本システムにより 鋳型内溶鋼 レベルを制御した例を Fig. 8 で示す。この例でみられるように手動運転の場合にはノズル開度はステップ状に制御されるため、短周期の変動は少ないが長周期のレベル変動がみられる。一方、自動運転の場合には、連続的にノズルの開度制御が行われるのでレベル変動は非常に小さくなつている。手動運転の場合のレベル変動は ±20 mm 程度であるが、自動運転の場合には、±5 mm 以内の変動で安定にレベル制御が行われている。

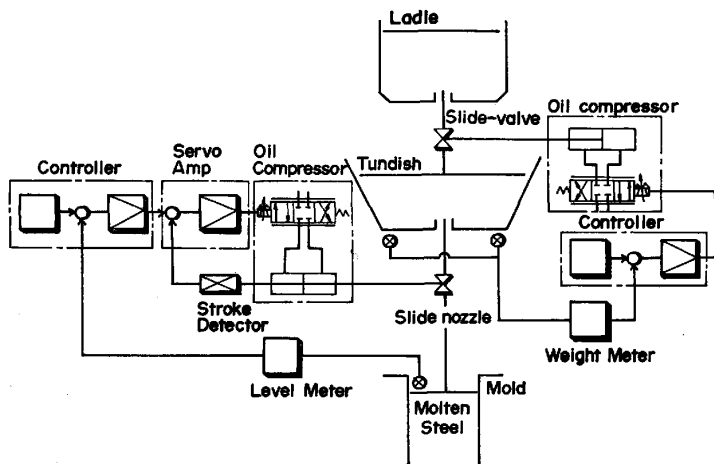


Fig. 7. Automatic casting system in a continuous casting machine.

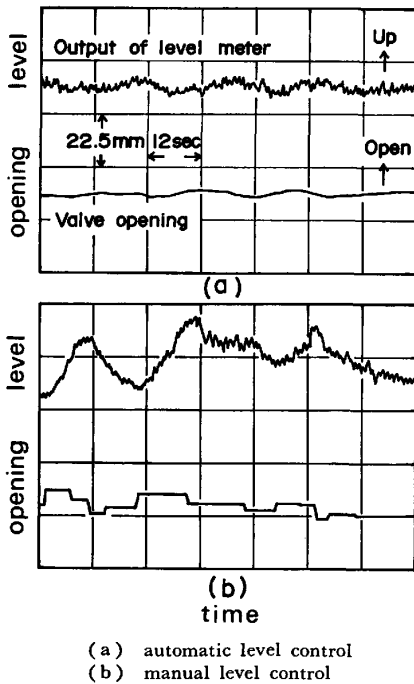


Fig. 8. Results of level control in the mold.

5. 考 察

5.1 電極へのスラグの付着

電極へのスラグの付着は電極材料だけでなく、電極の動作に密接に関連している。電極へのスラグの付着現象は次のように考えることができる。電極は、サーボ機構によりスラグ層内で微小変位を繰り返している。この変位量は何らかの原因で大きくなり、スラグ層から引き上げられた場合、電極に付着したスラグは急激に冷却され、固化する。この状態で再びスラグ層内に浸漬されると、固化したスラグ上に、再びスラグが付着する。このように電極がスラグ層内からの出入りを頻繁に繰り返すと、付着したスラグはダンゴ状に成長してゆく。したがって従来法による電極式レベル計の場合のように、ON-OFF的なレベル検出方法では濡れ性の悪い材料を用いても、スラグの付着が必ず起こる。一方、本方法のように、サーボ機構を用いて連続的にレベル検出を行えば、電極の移動量は非常に小さくなり、スラグ付着の問題は、ほとんど解決できる。

5.2 スラグの電気抵抗特性

Fig. 2 に示したスラグの電気抵抗特性は、スラグ厚さと共に変化する。そのときのレベル計の振舞いと制御性について以下で検討する。レベル計の応答特性の解析にあたって、調節系には PI 制御を用い、レベル計は通常のサーボ機構としてシミュレーションを行つた。また、外乱として、制御システムに正規外乱を加えた。

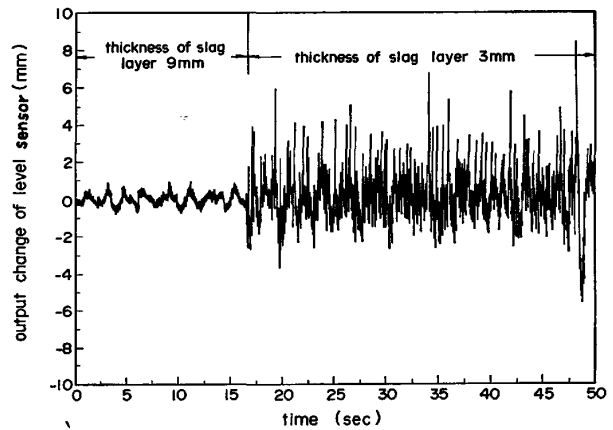


Fig. 9. Illustration of an out-put change of the level meter with thickness change of slag layer from 9 mm to 3 mm.

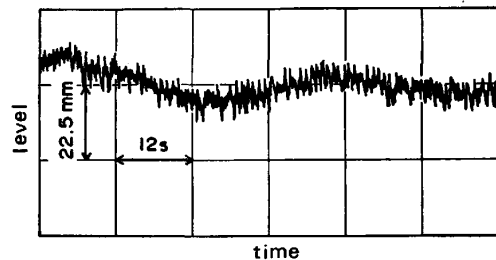


Fig. 10. Diagram illustrating result of electrode hunting when meter is used in thin slag layer.

溶融スラグの厚さが 9 mm から 3 mm に変化したときのレベル計の応答を、Fig. 9 に示す。この図から明らかかなようにスラグ層が極端に薄くなると、レベル計の振幅および振動周波数が大きくなり、いわゆる、ハンチング現象を起こしていることがわかる。これは、スラグ層が薄くなると、レベル変動に対する抵抗特性が大きく変化して、わずかなレベル変動に対してもレベル計の電極位置を制御するゲインが増大する。その結果、外乱に対して非常に敏感になるためである。この現象は、Fig. 10 にみられるようにレベル計出力の記録に、実際に観測されている。一方、溶鋼レベルの変動は Fig. 9 のレベル計出力とは少し様子が異なる。その様相を Fig. 11 のシミュレーション結果により示す。これは溶鋼流量制御系の応答特性がレベル計の特性より悪く、高い周波数の入力に対して応答できないためである。また、スラグ層が薄くなると、レベル変動にオフセットが生じている。この現象は次のように説明される。スラグ層の厚さの減少は、溶鋼レベルの低下とみなされ、スライドノズルに開度指令が出される。その結果、溶鋼レベルが上昇する。実際にはスラグ層の厚さはステップ状には変化しないので、このような現象はみられないが、長周期のレベル変動は、このことに起因すると考えられる。以上のことか

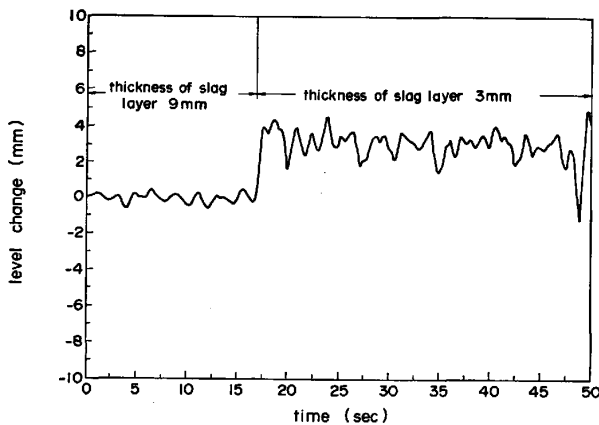


Fig. 11. Diagram illustrating level change when thickness of slag layer changes from 9 mm to 3 mm.

ら、パウダー厚みは少くとも 5 mm 以上の厚さになるように管理することが望ましいことがわかる。

5.3 スライドノズルの流量特性の変化

鑄型内溶鋼レベル制御システムに加わる外乱には、スライドノズルの流量特性変化や鑄造速度の変化などがあ

る。スライドノズルの流量特性変化の原因としては、
 (1) レードル交換時に顕著にあらわれるタンディッシュ内の溶鋼重量変動による溶鋼静圧の変化、および (2) スライドノズルの開口面積の変化の 2 つが考えられる。溶鋼静圧の変化は、このレベル制御システムで、ほとんど対応できるため大きな問題ではない。一方、スライドノズルの開口面積の変化の原因には、鑄造鋼種により溶損による断面の拡大と Al_2O_3 などの析出による閉塞の 2 つがある。前者の場合は、制御系のゲインが増大したのと同様であり、制御性に重大な影響は及ぼさないが、後者の場合は、析出が始まると急速に成長し、開口面積が半分以下になることもありうる。開口面積の減少は制御系のゲインの減少と同様であり、極端な場合には、スライドノズルを 100% 開口しても所定の鑄造速度で鑄造できなくなる。このような状態ではレベル制御はもはや不可能で Ar バブリング等により析出した Al_2O_3 を取り除く必要がある。

5.4 熱電対式レベル計との比較

電極式レベル計の特性を他のレベル計と比較するために従来よりよく用いられている熱電対式レベル計と比較した。熱電対式レベル計では、鑄型表面より 10 mm の深さに、垂直方向に 10 mm 間隔で銅壁に埋め込んだ熱電対群を用いた。この熱電対群により、鑄型の温度分布を測定し、溶鋼レベル位置はその温度分布が最大勾配を示す位置から検出した。両者のレベル検出結果を比較した図を Fig. 12 に示す。両者ともレベル変動を良く検出

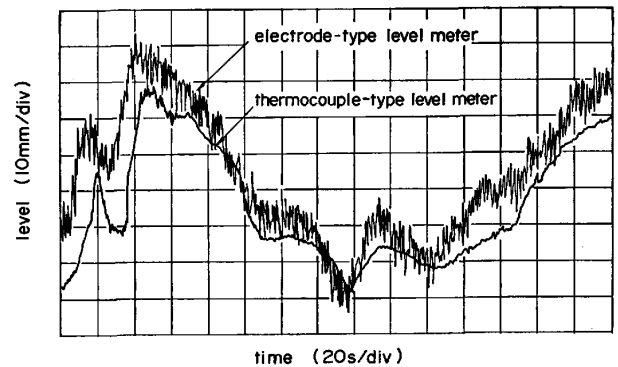


Fig. 12. Out-put of the electrode-type level meter and the thermocouple-type level meter.

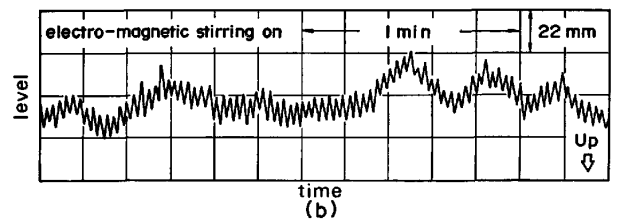
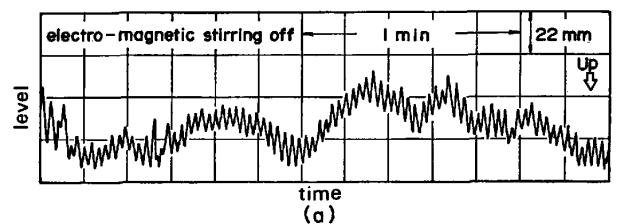


Fig. 13. Effect on out-put of the electrode-type level meter with electro-magnetic stirring in the mold.

しているが、熱電対式レベル計は電極式レベル計より 5 ~ 10 s 程度の遅れを示している。また、レベル変動の様子がなまつた形をしており、明らかに応答が遅いことがわかる。熱電対式レベル計を用いて、PI 制御によりレベル制御を行うと、上記の理由により、制御系のゲインを高めることが困難で、突発的な外乱に対して十分に対応できない。

5.5 電磁攪拌の影響

最近の高級鋼用連鑄機では、鑄型内電磁攪拌が行われるようになってきた。当社のブレード連鑄機の場合には、鑄型内電磁攪拌装置が設置されている。電磁攪拌は鑄型外部から溶鋼に強力な低周波回転磁場をかけることにより溶鋼を攪拌している。そのため、従来のレベル計では、電磁ノイズによる外乱やレベル計の設置方法など種々の問題が生じる。特に電磁ノイズの影響は大きく、熱電対式レベル計では周期的ノイズではあるが、温度信号より誘導ノイズ信号の方が大きく検出されるため、レベル計として使用するにはかなり問題がある。

電極式レベル計の場合は、鑄型内電磁攪拌を対象にし

て開発した経緯もあり、誘導ノイズは、ほとんど問題にならない。Fig. 5 に示したように、信号処理装置にも誘導ノイズを除くために、バンドパスフィルターを入れノイズ対策を施している。Fig. 13 にレベル計出力に及ぼす電磁攪拌の影響を示す。図の上段(a)は電磁攪拌をかけていないときのレベル計出力であり、下段(b)は電磁攪拌中の図を示している。この図は手動運転時の例である。また、この実験では、レベル計を鋳型カバー上に設置したため、鋳型振動の影響を受けてレベル計出力が、上下に振動している様子があらわれている。実際の装置では、タンディッシュカーにレベル計を塔載しているので鋳型振動の影響はあらわれない。この図から明らかかなように、無攪拌時と電磁攪拌時のレベル計出力を比較すると、両者の出力に差異は認められない。

以上述べたように、電極式レベル計では、電磁攪拌による誘導ノイズの影響は無視できるが、レベル計の構造に起因する問題がある。電極昇降装置にはワイヤが用いられており、電極は自重により降下する。そのため、電極が溶鋼流に引きずられて傾倒し、誤動作をする。前述のごとく、ワイヤを使用する理由は、測定スパンを容易に拡大することが可能であり、しかも操作性が良いという利点を重視したためである。ワイヤの代わりに、アームを使用すれば、この問題は解決できるが、上記の利点は失われる。そこで、溶鋼流の最大流速を考慮して電極ホルダの重量を増加させること、および、ワイヤに振れ止め機構をつけることなどの対策を施し、電極が溶鋼に流されるという問題点を解決している。

6. 結 言

連鋳機の鋳型内容鋼レベル制御を行うために電極式レベル計を開発し、自動鋳込みシステムを確立した。

6.1 電極式レベル計の仕様

- (1) 測定原理 スラッグの電気抵抗特性を利用した電

極追従方式

- (2) 測定範囲 max 500 mm
 (3) 測定精度 ± 1 mm
 (4) 追従速度 max 70 mm/s

6.2 電極式レベル計の特徴

- (1) レベル計は小型なのでタンディッシュカーに塔載でき、鋳型周辺での作業の障害にならない。
 (2) 測定範囲が広く、かつ、測定精度も高い。
 (3) ドリフトや誘導ノイズなどの影響が少なく、電磁攪拌時のレベル計として最適である。
 (4) 追従速度が大きく、連鋳機のほとんどの異常時に対処できる。
 (5) メインテナンスが簡単である。

6.3 自動鋳込みシステム

自動鋳込みシステムは (1) レードル内の溶鋼重量制御システムと (2) 鋳型内容鋼レベル制御システムから構成されている。各システムの制御精度は、前者の場合は、 ± 0.5 t、後者の場合は ± 5 mm である。

電極式レベル計は、当社のブルーム連鋳機で約2年間にわたるフィールドテストを経て、種々の問題点の解決を図り、神戸製鉄所、および加古川製鉄所で設備化し、現在、両製鉄所で順調に稼働している。

文 献

- 1) J. H. WILSON: Instr. Tech. (1971) 6, p. 37
- 2) 今田 紘, 川田 豊, 小島康徳: 神戸製鋼技報, 29 (1979) 3, p. 83
- 3) 佐野和夫, 安藤静吾, 山田健夫, 石黒守幸, 中島広久, 山田俊郎: 日本鋼管技報, 84 (1980), p. 35
- 4) 吉原晃代, 井出上和夫, 関口保明, 鈴木史郎, 西村 統, 佐々木邦政: 鉄と鋼, 67 (1981) 8, p. 1128
- 5) 特許公報: 特開昭 49-52125, 50-56971, 50-81920, 特告昭 46-27224