

論 文

UDC 621.746.27.047 : 621.746.39

スライディングノズルによる連続鑄造機の自動鑄込について*

梨和 甫**・橋尾守規***・徳田 誠**・青木紀之**

Automatic Casting at Continuous Slab Casting Machine Using Slide Gate Nozzle

Hajime NASHIWA, Moriki HASHIO, Makoto TOKUDA, and Noriyuki AOKI

Synopsis:

This paper deals with an automatic casting system for a slab caster developed in Wakayama and Kashima Works of Sumitomo Metals Industries Co. Ltd. This automatic casting system is composed of two sub-systems described below;

- (1) automatic controlling system of the slide gate nozzle for a ladle to keep the molten metal weight in the tundish constant.
- (2) automatic controlling system of the slide gate nozzle for a tundish to keep the molten metal level in the mold constant.

This system was completed in October in 1973 after precise analyses and improvements mentioned in the text. Since then, it has resulted in good effects on the operation and the quality as follows;

- (1) deviation of the molten metal weight in the tundish can be controlled within 1.0 ton.
- (2) deviation of the molten metal level in the mold can be controlled within 5 mm.
- (3) stabilized molten metal level in the mold brings better surface quality of a cast slab.
- (4) number of operators is reduced.

(Received Nov. 22, 1973)

1. 緒 言

連続鑄造操業においては、生産性の向上、作業環境の改善などの目的で種々自動化が行なわれている。一方、とくに大型スラブ用マシンの鑄込作業においては、モールド内湯面の安定が操業上、およびスラブ品質の点からきわめて重要であるが、この鑄込作業の自動化については、制御機器および耐火物などの制約から遅れており、従来はオペレーターの熟練に頼っていた。しかしながらストッパー方式に代わるスライディングノズル(SN)の実用化およびそれを駆動する油圧装置の進歩などにより、これまでとは一段と飛躍した自動化の可能性が出現した。

住友金属和歌山 No 2, 鹿島 No 1 スラブ用連続鑄造機は稼動当初より、取鍋、タンディッシュとも全面的に SN を採用しており、ノズルに起因するトラブルはほとんど皆無の順調な操業を行なっている。一方 SN の利点を最大限に発揮するために、取鍋～タンディッシュ～モールド間の自動鑄込技術の開発に取り組んできて、今回ほ

ぼその技術を完成したので、その概略について紹介する。

2. 自動鑄込システム

2.1 自動鑄込システムの概要

自動鑄込システムは、Fig. 1 に示したように大きく分けて二つのシステムから成り立っている。すなわち、タンディッシュ内溶鋼重量を一定に保つためのタンディッシュ内溶鋼重量制御装置と、モールド内の湯面を一定に保つためのモールド内湯面制御装置(レベコン)から成り立っている。

2.2 タンディッシュ内溶鋼重量制御

タンディッシュ内溶鋼重量制御はロードセルによつて検出したタンディッシュ内溶鋼重量を利用し、この重量が設定重量になるように、取鍋の SN の開度調整をタイマーの組合わせで行なう ON-OFF 制御方式である。すなわちタンディッシュ内溶鋼重量が、設定重量より大か

* 昭和48年11月22日受付

** 住友金属工業(株)和歌山製鉄所

*** 住友金属工業(株)鹿島製鉄所

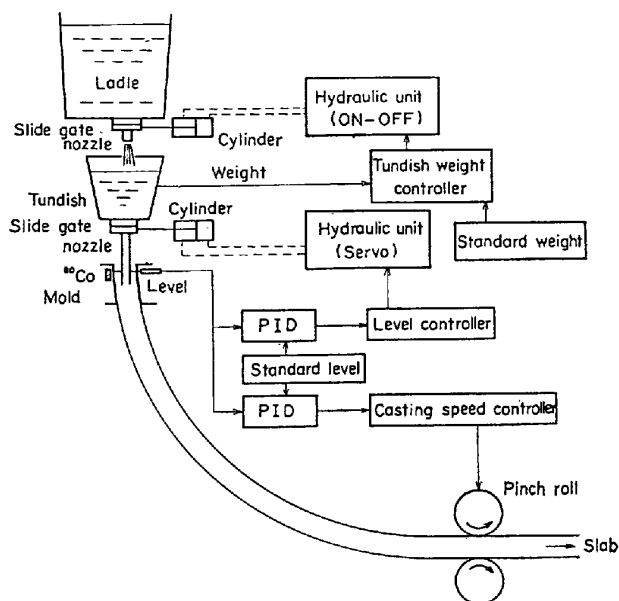


Fig. 1. Automatic casting system.

Table 1. Specification of tundish weight controlling system.

Detection of molten metal weight	<ol style="list-style-type: none"> 1. By load-cell under the rail for tundish car (Tundish shell weight is compensated by correcting circuit). 2. Molten metal weight in tundish; 0~25 t 3. Output signal; 4~20mA
Hydraulic system of slide gate nozzle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Controlling method; ON-OFF control 2. Hydraulic pressure; 180~210 kg/cm² 3. Cylinder stroke; 200 mm
Slide gate nozzle installed to Ladle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Type; Interstop type-3C 2. Nozzle diameter; 60~70 mm φ

小かを判定し、さらに重量が増加しつつあるか、減少しつつあるかを検出することにより、SNの開度を段階的に制御する方式である。制御装置の仕様を Table 1 に示す。

2.3 モールド内湯面レベル制御 (レベコン)

モールド内湯面レベルの安定は、操業上あるいはスラブ品質上からきわめて重要である。湯面レベルを一定にする方法として、ピンチロールの引抜速度の調整による方法と、タンディッシュのSNの開度調整による方法がある。以下この2方法について説明する。

2.3.1 引抜速度制御

モールドに固定した⁶⁰Coのγ線により検出したモールド内の溶鋼レベルを利用し、これが一定になるように引抜速度を制御する方式である。実際の鑄込に使用したときの記録を Fig. 2 に示す。このようにモールド内レ

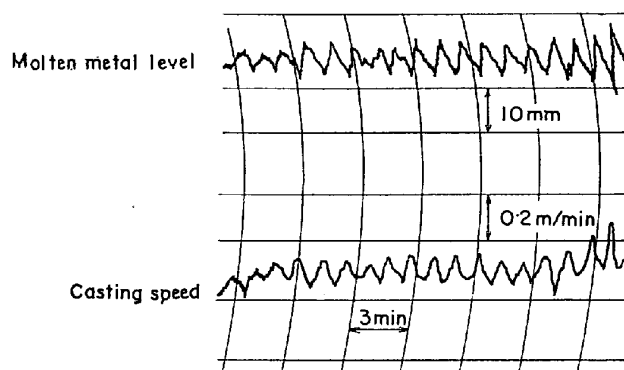


Fig. 2. Record of level control by casting speed.

Table 2. Specifications of molten metal level controlling system.

Items	Specifications
Detection of molten metal level in the mold	<ol style="list-style-type: none"> 1. Detection method; Transmission of γ-ray 2. Source of γ-ray; ⁶⁰Co 3. Detector; scintillation counter 4. Detectable range; 40~180 mm from top of mold
Controlling system of slide gate nozzle	<ol style="list-style-type: none"> 1. Controlling method; Continuous control by servo valve 2. Controller; PID 3. Hydraulic pressure; 180~210kg/cm² 4. Cylinder stroke; 200 mm
Slide gate nozzle installed to tundish	<ol style="list-style-type: none"> 1. Type; Interstop type-3C 2. Nozzle diameter; 60~70 mm φ

ベルは、±5 mm 以内におさまるが、この方式は、ピンチロールのスリップなどの外的要因の変動により、鑄込速度の変動が大きくなることがあり、操業上のトラブルが懸念される。また品質的にも、湯面レベル、鑄込速度とも一定の場合、ヨコワレ、タテワレなどのスラブ表面欠陥の発生が、もつとも少ないことが確認されているので、つぎに述べるタンディッシュSNによるレベコン技術の完成により、現在では補助機構としてのみ使用している。

2.3.2 スライディングノズル制御

検出したモールド内溶鋼レベルを利用し、このレベルが一定になるようにタンディッシュSNの開度を自動的かつ連続的に制御する方式である (Fig. 1 参照)。

SNの作動は、従来のストッパー方式に比べてきわめて確実ではあるが、高圧 (180~210 kg/cm²) の油圧を利用しており、しかもレベコンが非常に高い制御精度を要求されているために連続制御方式を採用せねばならないという点で種々の問題があつた。本制御方式の導入当初はハンチングがひどく、ほとんど使用不可能であつた

が、自動制御理論を導入し、制御系の解析と種々の改善を実施した結果、レベルの安定（すなわち系の安定）が可能となり、実用化が可能となった。本制御装置の仕様を Table 2 に示す。

3. 使用結果

3.1 試験経過

自動鑄込システムの開発試験は昭和 46 年 9 月和歌山製鉄所において、タンディッシュ内溶鋼重量制御と引抜速度によるモールド内湯面自動制御から開始し、昭和 47 年末には和歌山、鹿島両製鉄所ともほぼその技術を完成させた。一方タンディッシュ SN 制御のテストは昭和 48 年初めに鹿島、和歌山両製鉄所においてあいついで成功して以来、両所において種々の解析と改善を実施して昭和 48 年 10 月にはほぼその技術を完成させ、オンラインの使用を開始した。

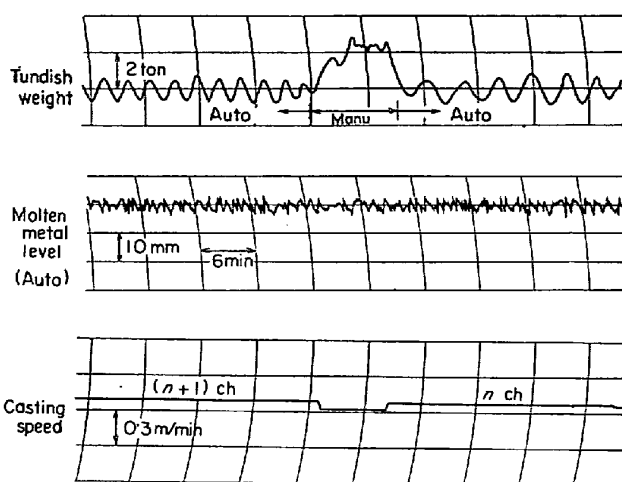


Fig. 3. Record of automatic casting.

3.2 操業結果

Photo. 1 に自動鑄込を行なっているときの鑄込状況を示す。この写真に示すように自動鑄込時は、取鍋ノズルオペレーターは取鍋交換時のみ S N の開度調整用ペンダントスイッチの操作をするだけであり、またモールドオペレーターは湯面の観察とパウダーの投入、スラグベアーの除去などを行なうのみでよく、鑄込作業の省力化が可能となっている。

Fig. 3 に自動鑄込を行なつた場合のタンディッシュ内溶鋼重量、モールド内レベル、鑄込速度の変化状況を示す。このように自動鑄込時はモールド内湯面は ± 5 mm 以内、タンディッシュ内溶鋼重量は ± 1 t 以内で制御が可能である。また取鍋交換時に鑄込速度を変化させてもモールド内湯面は一定のままに十分に追従し、きわめて安定していることがわかる。

4. 考 察

4.1 制御系の解析

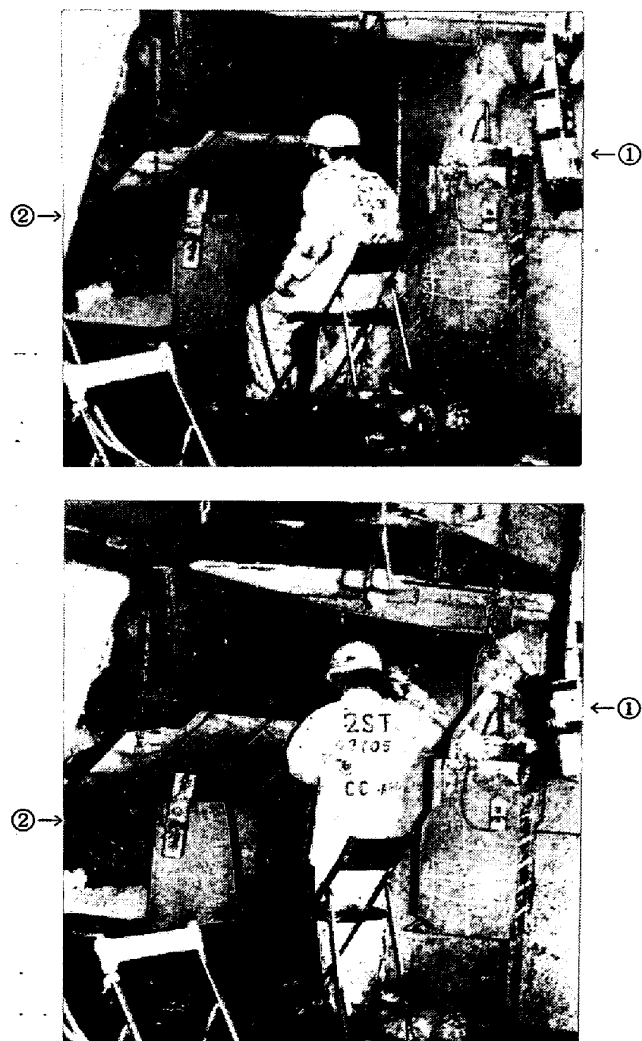
本自動鑄込システムにおける最大の問題はタンディッシュ SN の自動制御により、いかにモールド内湯面を安定させるかということであつた。そこでこの制御系の詳細な解析を実施し、系の安定のための考察を実施した。

タンディッシュ SN 制御系のブロック図を Fig. 4 に示す。

ここで、 G_c , G_h , G_m , はそれぞれ調節計、油圧、モールドでの伝達関数とする。 G_c , G_h , G_m を計算および実験によつて求め、系全体の一巡伝達関数 $G = G_c \cdot G_h \cdot G_m$ を計算し、これを利用し、自動制御理論に基づいて系の安定性の検討を行なつた。

4.1.1 調節計 (P · I · D) の伝達関数 G_c

G_c はつぎのようにあらわされる。



① : Pendant switch box for ladle SN
② : Pendant switch box for tundish SN

Photo. 1. Views of automatic casting.

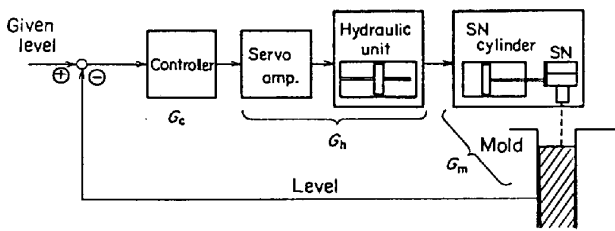


Fig. 4. Control system by slide gate nozzle.

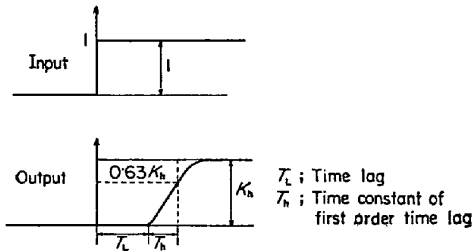


Fig. 5. Response of hydraulic system.

$$G_c = K_P \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで K_P , T_I , T_D は調節計の比例, 積分, 微分定数で任意に設定しうる値. s は複素数.

4.1.2 油圧系の伝達関数 G_h

油圧系は解析を容易にするために, 時間遅れ T_L を伴う, 1次遅れ系になると仮定した.

すなわち, Fig. 5 に示したようにステップ関数の入力に対して, 出力は図で示したような形で近似できるのでこれを時間遅れを伴う1次遅れ系になると仮定すると伝達関数 G_h は次のような形で表わされる.

$$G_h = \frac{K_h}{1+sT_h} \cdot e^{-sT_L} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\frac{K_h}{1+sT_h}$ は1次遅れ, e^{-sT_L} は時間遅れ (無駄時間) 要素を意味する.

なお, T_h は1次遅れ系における時定数, T_L は時間遅れ (無駄時間) であり, それぞれ実測値である. また s は複素数である.

4.1.3 モールドでの伝達関数 G_m

タンディッシュ内溶鋼ヘッドが一定の場合, ある制御範囲内ではSNの開度 x とモールドへの溶鋼流入量 q は Fig. 6 に示したように直線関係にあると仮定できる.

$$q = k \cdot x \quad (k: \text{比例定数})$$

これをラプラス変換し, ノズル変位とモールド内への流入量の関係を示す伝達関数 G_{m1} を求めると次式のようになる.

$$G_{m1} = k \dots\dots\dots (3)$$

つぎにモールドへの溶鋼流入量の変化 q_i とモールド

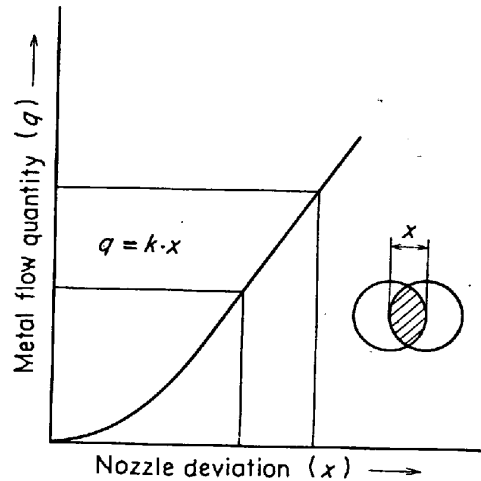


Fig. 6. Relation between nozzle deviation and metal flow quantity.

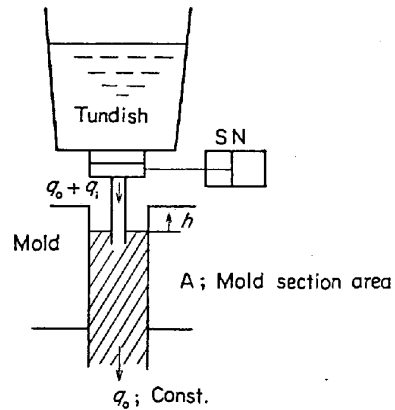


Fig. 7. Relation between metal flow quantity and molten metal level.

内湯面レベル h の関係は次式で表わされる (Fig. 7 参照).

$$A \cdot \frac{dh}{dt} = q_i \dots\dots\dots (4)$$

A : モールド断面積

t : 時間

これをラプラス変換して, モールドへの溶鋼流入量とモールド内湯面レベルの関係を示す伝達関数 G_{m2} を求めるとつぎのようになる.

$$A \cdot sH(s) = Q(s) \dots\dots\dots (5)$$

s : 複素数

$$\therefore G_{m2} = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{A \cdot s} \dots\dots\dots (6)$$

したがってノズル変位とモールドレベルの間の伝達関数 G_m はつぎの(7)式のようなになる.

$$\therefore G_m = G_{m1} \cdot G_{m2} = \frac{k}{A} \cdot \frac{1}{s} \equiv \frac{K_n}{s} \dots\dots\dots (7)$$

したがって制御系のブロック図は Fig. 8 に示したよ

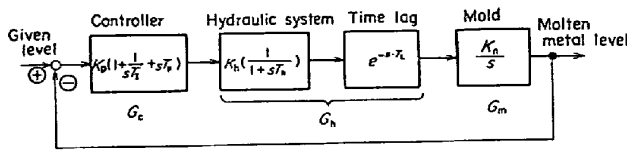


Fig. 8. Block diagram of control system.

うになる。

4.2 安定性の考察と改善

(1), (2), (7)より系の一巡伝達関数Gを求めるとつぎのようになる。

$$G = K_p \cdot K_h \cdot K_n \frac{(1 + 1/sT_I + sT_D)}{(1 + sT_h)s} e^{-sT_L} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式の、 K_h , K_n , T_h , T_L は実験または実操作より測定できる値であり、 K_p , T_I , T_D は設定可能な定数である。すなわちすべての定数は既知または可変な定数である。そこでこの式を利用し、自動制御理論からの検討を加えて系がもつとも安定するのに必要なこれらの定数を決定した。

4.2.1 系に遅れがないと仮定した場合の安定性

系に時間遅れがまったくないというような理想的な場合の安定条件を求め、これを最低条件とした。

このような場合

$$T_L = 0$$

したがって(8)式は、線形化されて次式となる。

$$G = K_p K_h K_n \frac{(1 + 1/sT_I + sT_D)}{(1 + sT_h)s} \dots\dots\dots (9)$$

よって自動制御理論における特性方程式 $1 + G = 0$ は s について整理するとつぎのような式で表わされる。

$$T_h T_I s^3 + T_I (1 + K_p K_h K_n) s^2 + K_p K_h K_n T_I \cdot s + K_p K_h K_n = 0 \dots\dots\dots (10)$$

このような線形化された系の場合には Hurwitz の安定判別法¹⁾が使用できる (Appendix-1 参照)。

(10)式を利用し、Hurwitz の安定判別法を利用すれば系の安定性条件としてつぎの条件式が得られる。

$$T_I > T_h \dots\dots\dots (11)$$

すなわち系に遅れがまったくないような理想的な場合でも、系が安定するためには、調節計の積分定数は油圧系の一時遅れ要素の時定数より大きな値を選定する必要がある。

4.2.2 系に遅れがある場合の安定性

つぎに系に遅れがある場合の検討を実施した。実際の系には必ずなんらかの遅れの要素がある。このような遅れ要素は系を不安定にしやすい。そこで遅れを含んだ系の安定性を判別する方法として Nyquist のベクトル軌跡法²⁾を用いた (Appendix-2 参照)。

すなわち(9)式を利用し、周波数伝達関数 $G(j\omega)$ のベクトル軌跡を、調節計の比例、積分、微分定数 (K_p , T_I , T_D) をパラメータにして複素数平面で描いたところ、これらの定数を適当に選択すれば、安定系が得られることが判明し、実際の鋳込においてもレベルが安定することが確認された。

系を不安定系に近づける最大の因子は、系の遅れ要素であるために、われわれは遅れがなくなるように、SN のメカニカルなクリアランス、油圧ホースの膨張が極力少なくなるような改善を実施した。

系の遅れの大きい場合と小さい場合の比較を Fig. 9 に示す。

一方、調節計の微分要素の効果としては、微分要素は位相を 90° 進める。すなわち予測制御ができるようになるため、このような遅れの大きい系の場合には、微分要素の効果は大である。例として系の遅れが比較的大きい場合に微分要素を入れた場合と外した場合の比較を Fig. 10 に示す。

このようにして、レベルがもつとも安定するための条件を実鋳込を利用しながらテストし、最適条件を把握した。

4.3 装置上の改善

安定性を得るための上記改善のほか、操作を容易にするために種々の改善を実施した。

そのおもなものは

(1) 操作切替の容易化

自動～手動、手動～自動がワンタッチで行なえるようにした。

(2) 油圧リークの自動補正

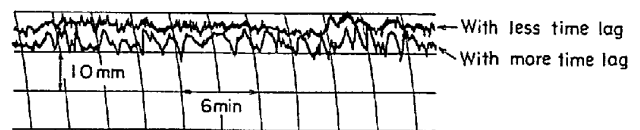


Fig. 9. Influence of time lag on stability of molten metal level.

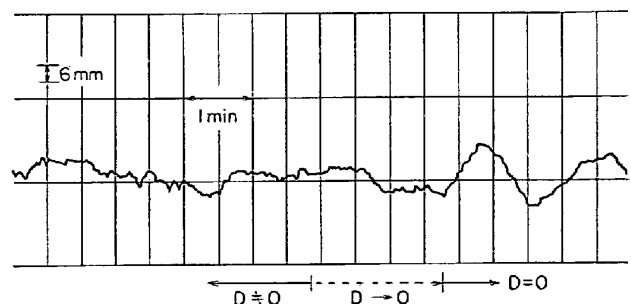


Fig. 10. Influence of differential element on stability of molten metal level.

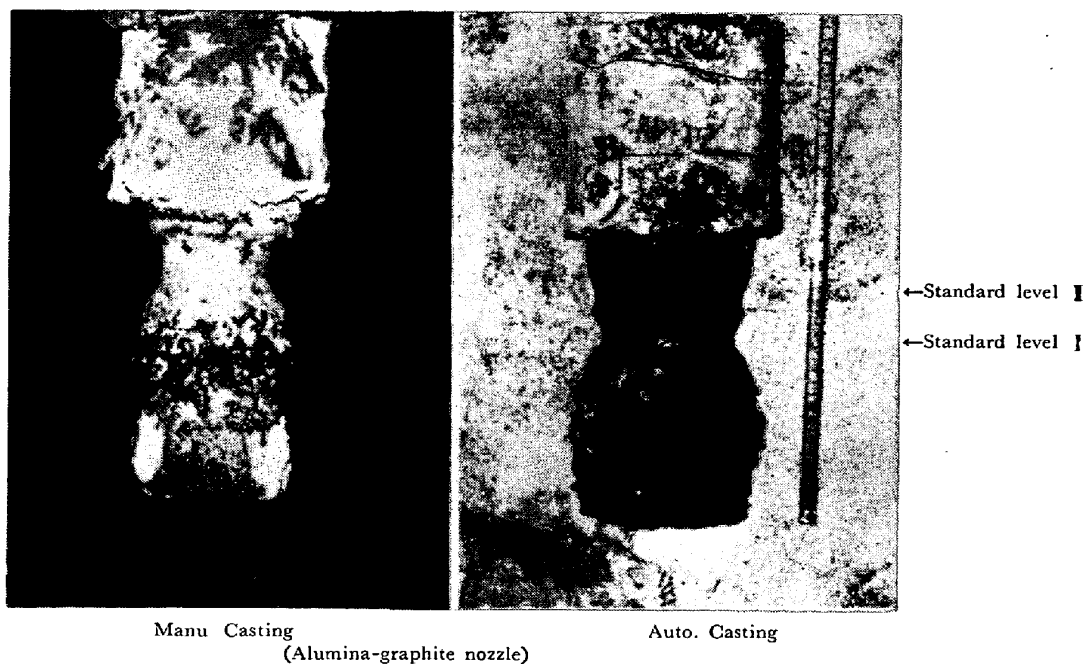


Photo. 2. Erosion of submerged nozzle.

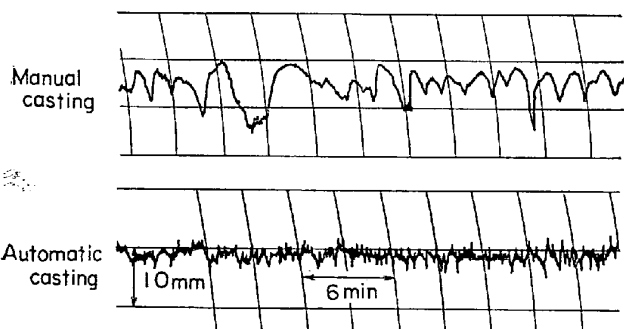


Fig. 11. Records of molten metal level (Manu. Auto.)

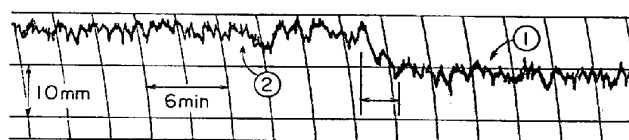
油圧シリンダーのリークが生じた場合、自動的に補正できるようにした。

4.4 モールド内湯面の安定性の比較

Fig. 11 に自動铸込を行なった場合と、手動铸込を行なった場合のモールド内湯面変動の比較を示す。湯面は自動のほうが手動のときよりも安定していることがわかる。

このような湯面の安定状況は、たとえば Photo. 2 に示したモールドパウダーによるアルミナグラファイト製浸漬ノズルの溶損の外観写真からも明らかである。

この写真の右側が自動铸込後のノズルの外観であり、パウダーによる溶損がきわめて局部的になつている。したがってノズル先端折れなどのトラブルの原因となるので、現在は铸込途中でモールド内基準レベルの変更を実施しており、右側の写真に示すようにノズルの溶損が2段になつているのはそのためである。そのときのモールド



① Standard level I ② Standard level I
Fig. 12. Level change during casting.

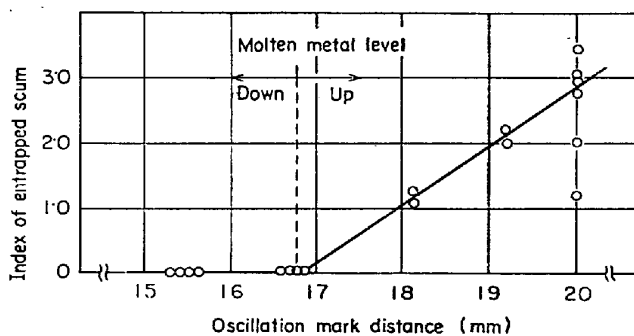


Fig. 13. Relation between level fluctuation and entrapped scum of slab surface.

ド内湯面の記録を Fig. 12 に示す。

4.5 スラブ表面への影響

つぎにモールド内湯面が安定している効果として、スラブ表面成績に及ぼす効果について述べる。湯面の変動とたとえばスラブ表面ノロカミの関係については、従来から Fig. 13 に示したように湯面が上昇するときノロカミが多発することが知られている。そこで Table 3 に自動铸込を行なった場合と、手動铸込を行なった場合のスラブ表面成績の比較を示す。ノロカミ、スナカミ(ア

Table 3. Index of slab surface defects.

	Longitudi- onal crack	Transverse crack	Entrapped scum	Pin hole, sand inclusion
Manual	1.0	1.0	1.0	1.0
Auto	1.0	0	0.7	0.5

ルミナクラスタなどの直径 2 mm 以下の表面介在物),
ピンホールといった表面欠陥は自動鑄込のほうが湯面が
安定している効果として少なくなっている。また自動鑄
込みのスラブはヨコワレ欠陥の減少も認められるが、こ
れは湯面が安定しているためにパウダーの流れ込みが均
一になるためと考えられる。このようにスラブ表面成績
も自動鑄込のほうが良好であることが確認された。

5. 結 言

昭和 46 年よりスラブ用連続鑄造機における S N を利
用した取鍋〜タンディッシュ〜モールド間の自動鑄込技
術の開発に取り組んできたが、制御系の種々の解析とテ
スト、改造を実施した結果、その技術を完成させ、昭和
48 年 10 月より両ストランドともオンラインの実用化が
達成された。これにより、鑄込作業の省力化とともにス
ラブ表面品質の向上が可能になった。

文 献

- 1) たとえば, 増淵: 自動制御基礎理論, 標準機械工
座 19, (1965), p. 57 「コロナ社」
- 2) たとえば, 平岡: 化学工学者のためのプロセス制
御 (化学工学協会編), (1968), p. 96 「いずみ書房」

[Appendix-1] Hurwitz の安定判別法

特性方程式 $1+G=0$ を s について整理し,

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

のような線形化された形で表わされるとするとき, 系が

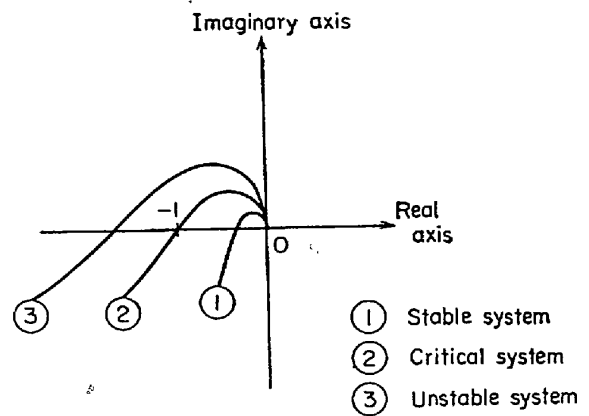


Fig. 14. Vector locus of frequency transfer function.

安定する条件は、次の 2 つの条件が同時に満足されるこ
とである。

- (1) 係数 a_0, \dots, a_n がすべて正
- (2)
$$\Delta_i = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & a_{2i-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & a_{2i-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_1 \end{vmatrix}$$
 とおいたとき (ただし $i=2, \dots, (n-1)$)

Δ_i がすべて正

[Appendix-2] Nyquist のベクトル軌跡による判定法
周波数伝達関数 $G(j\omega)$ のベクトル軌跡を複素数平面
に描きその軌跡で系の安定性を判定する方法である。

Fig. 14 に示したようなベクトル軌跡が得られた場合

- ①は安定な系
- ②は臨界状態にある系
- ③は不安定な系

である。一般に系の遅れが大きくなつていくと、ベクト
ル軌跡は③の不安定状態に近づいていく。