

論 文

炉内冶金反応制御システムを用いた転炉の 全自動吹錬技術

飯田 義治*・江本 寛治*²・小川 正勝*²
大西 正之*²・山田 博右*²

Fully Automatic Blowing Technique in BOF Using Slag Formation Control System

Yoshiharu ÎDA, Kanji EMOTO, Masakatsu OGAWA,
Masayuki ÔNISHI, and Hirosuke YAMADA

Synopsis :

Blow end control technique for carbon content and temperature in BOF has been remarkably improved by subplance. However it is necessary to develop technique for slag formation control for the purpose of obtaining over 90% simultaneous hitting ratio for carbon content and temperature and controlling of phosphorous content.

In Mizushima Works, for continuous detection of slag formation in BOF, various experiments such as measurement of furnace vibration, calculation with waste gas analysis, and measurement of sound were performed. Thus, the best reliability in the continuous monitoring of slag foaming height was found by measuring lance vibration during blowing. This technique is based on the principle that degree of lance vibration is correlated with lance length immerzed into foaming slag and oxygen flow rate. When slag foaming height is continuously detected, slag formation control can be realized by the correction of lance height or oxygen flow rate by computer. Combining this slag formation control technique with program blowing and blow end control ones, fully automatic blowing system was established. The system improved the hitting ratio and yield of steel, reduced reblowing ratio and lengthened furnace life.

1. 緒 言

純酸素上吹き転炉が、その高生産性と秀れた品質によつて製鋼法の主流を占めるようになってから、すでに 20 年余りが経過した。この転炉製鋼法は、その高速吹錬のために吹き止め（吹錬終点）における炭素含有量、溶鋼温度、およびリン含有量を所定の目標値に的中させることが困難であり、終点制御技術の向上は製鋼技術者の主要な課題であつた。純酸素上吹き転炉が我が国に導入されて以来、静的吹錬計算モデルによるコンピュータ制御が確立され¹⁾、数次にわたる改良が加えられたが、複雑に変化する炉内反応に対応できず、動的に吹錬制御する必要性から筆者らはサブランス装置と動的制御モデルを開発し²⁾、さらに吹錬の標準化によるプログラム吹錬を確立した。この段階で終点における溶鋼温度と炭素含有量の同時的中率は、従来の 50% から 90% へ到達したが、リン含有量の制御に対しては無力であり、また

溶鋼温度と炭素含有量の同時的中率も 90% の壁を確実に越えることはできなかつた。残された課題はスラグフォーメーション制御であり、そのためには炉内スラグの状態を連続的に検知する技術の開発が必要であつた。筆者らはこれに対して、吹錬用ランスがスラグフォーメーションに対応して振動することに着目し、ランス振動を測定することによつてスラグフォーメーションを動的に制御することに成功し、その結果吹錬を完全に自動化した。本技術によつて、純酸素上吹き転炉の吹錬技術は完成の域に達したといえる。本報告では全自動吹錬技術の骨子となつたスラグフォーメーション制御技術と、全自動吹錬の成果について述べる。

2. スラグフォーメーション制御技術の 開発のニーズと目標

従来の終点制御は、炭素含有量と温度を制御することに重点がおかれてきたが、転炉の終点制御はリン含有量

昭和 56 年 10 月 30 日受付 (Received Oct. 30, 1981)

* 川崎製鉄(株)技術本部 工博 (Technical Division, Kawasaki Steel Corp.)

*² 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

制御も満足しなければならない。脱リンを促進するには、スラグの塩基度および (FeO%) を高めることが有効であるが、塩基度を高めることは生石灰原単位を高めることであるからコスト上不利であり、また一般に塩基度を高めすぎるとスラグフォーメーションが困難になる。一方 (FeO%) を高めることは、鉄を燃焼させるわけであるから歩留り上不利であり、(FeO%) が高すぎると耐火物の溶損が増大し、さらに鋼中酸素の増加による品質の劣化をまねくことになる。加えて重要なことは、(FeO%) の高低すなわち鉄の燃焼量の大小が、発熱量の増減および脱炭に費やす酸素効率の変動をもたらす、炭素含有量、溶鋼温度の制御へも影響する。また (FeO%) を高めるソフトブロー吹錬が適切でなければ、炉口から溶鋼を含んだスラグを溢出するスロッピング現象をひきおこし、大幅な歩留り低下をまねく。このように転炉精錬に障害をあたえることなく、しかもスラグ中 (FeO%) を最適レベルに制御する作業が従来は熟練したオペレーターの、炉外に現れる現象の観察による経験と勘によつて行われてきた。筆者らは個人差のある技能によることなく、常に適切なスラグフォーメーションを得ることができる全自動吹錬技術の完成を目指した。

3. 全自動吹錬制御システムの構成

全自動吹錬制御システムは、Fig. 1 に示すように①～④のサブシステム群から構成される。

① スタティック制御サブシステム

反応に関連する物質収支、熱収支にもとづくスタティック制御モデルにより、原料配合計算、および吹錬に必要な酸素、冷却材、副原料の量を計算する。

② プログラム制御サブシステム

a) 吹錬前に選択された吹錬プログラムにしたがつて、ランス高さ、送酸速度を自動制御し、副原料を自動投入する。

b) 排ガス設備の運転制御、ガス回収操作、サブランスの運転 (測定開始) 制御を行う。

③ スラグフォーメーション制御サブシステム

ランス振動加速度測定値をもとに、スラグフォーメーション状況を連続的に検知し、かつランス高さおよび送酸速度を制御する。

④ サブランスによるダイナミック制御サブシステム
サブランスにより、吹錬中の溶鋼温度、炭素含有量を測定し、ダイナミック制御モデルにより吹き止め目標値に適中させるに必要な酸素および冷却材の量を算出して、冷却材の投入と吹錬停止を自動的に行う。

②のプログラム吹錬制御の仕様を Table 1 に示したが、吹錬初期条件 (溶銑配合、溶銑の温度と成分、炉況等) と終点条件 (吹き止め目標温度、成分) により吹錬パターンを選択すれば、Fig. 2 に例を示すような吹錬パターンで吹錬が自動的に進行する。つまりプログラム吹錬は、いわばスタティック制御である。

しかし約 20 min という短時間で進行する炉内反応

Table 1. Specification of program blowing

LH: Lance height FO₂: Oxygen flow rate

Item	Specifications
Pattern of blowing	15 patterns (combination of LH and Fo ₂)
Number of patterns	LH: 1.1 ~ 2.65 m (pitch 0.05 m)
Range of L.H. and Fo ₂	Fo ₂ : 450 ~ 800 Nm ³ /min (pitch 50 Nm ³ /min) Bias can be added to L.H.
Pattern of flux charging	Lime and dolomitic lime : 5 patterns
Number of patterns	Iron ore : 4 patterns Time of charging start and interval of charging are determined with computer

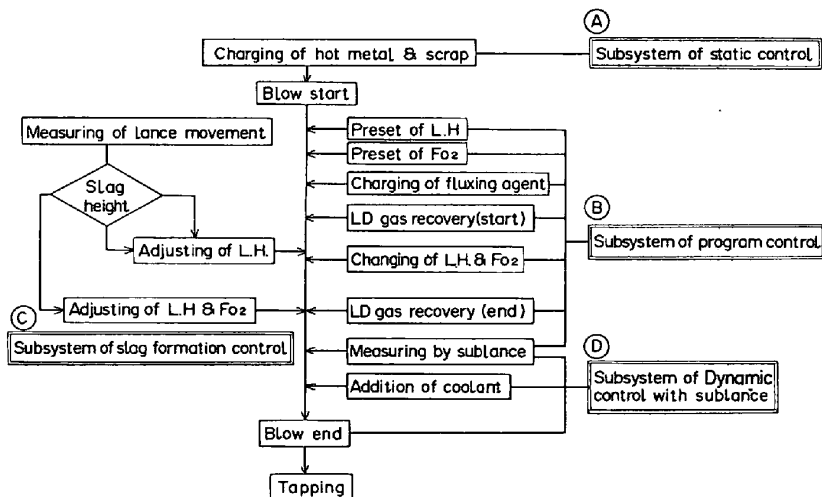


Fig. 1. System and function of fully automatic blowing.

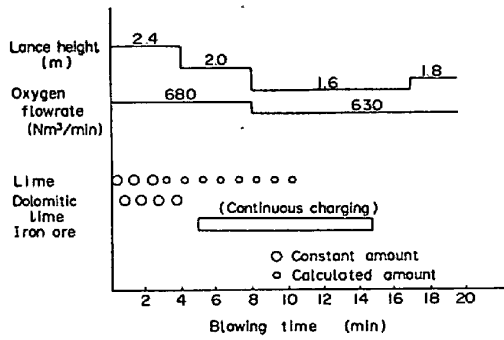


Fig. 2. Example of blowing pattern. (Mizushima No. 2 BOF)

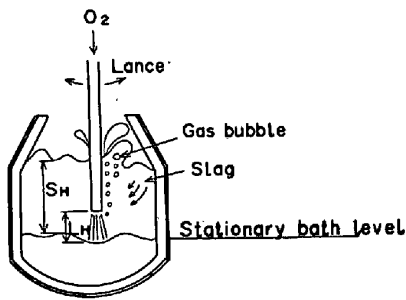


Fig. 3. Principle of lance vibration.

は、たとえ吹錬の初期条件、終点条件および吹錬パターンを同一にしても、スラグフォーメーションが一定になるほど単純ではなく、吹錬途中での手動介入操作は避けられず、スラグフォーメーションをダイナミックに制御する◎のスラグフォーメーション制御技術の完成によって初めて、吹錬を完全に自動化することが可能となった。

4. ランス振動測定を用いたスラグフォーメーション制御システム

吹錬によつて炉内では 80 ~ 120 kg/t.steel の CaO-SiO₂-FeO 系のスラグが形成される。反応性のよい適正なスラグが得られれば、このスラグは脱炭反応によつて発生する CO ガスによつてフォーミング (泡立ち) する。Fig. 3 に示すようにスラグがフォーミングしてランスにまで到達すると、ランスがスラグの運動エネルギーを受けて揺動することが現場観察により経験的に知られていた。このランスに与えられる運動エネルギーとスラグフォーミング高さとの間に、後述のように強い相関を見出し、ランス振動加速度測定によるスラグフォーミング高さ検知技術を開発した。

4.1 ランス振動とスラグフォーミング高さの関係

Fig. 4 にランス振動の測定装置、Table 2 に加速度計の仕様を示す。ランスはワイヤーにて懸架されており、ランスがスラグによる運動エネルギーを受ければ、

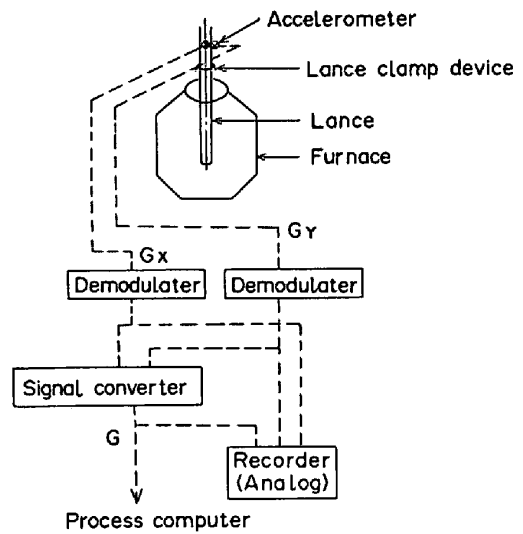


Fig. 4. Measuring device of lance vibration.

Table 2. Specification of accelerometer.

Item	Specification
Type	Quartz sensor
Measuring range	± 3 G
Response frequency	≈ 30 Hz
Signal	FM signal (70KHz ± 5KHz)
Dimension	20 x 20 x 50 mm

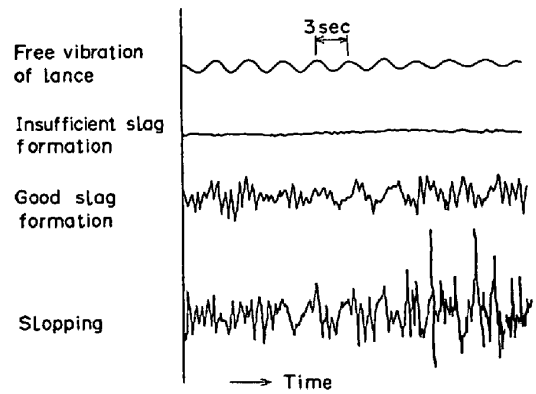


Fig. 5. Output signal of accelerometer.

ランスクランプ装置を支点として揺動可能な構造である。ランス本体の固有振動数は低いので、低い周波数の加速度変化の測定に有利な水晶発振加速度計を採用した。ランスの振動方向は常に一定しているわけではなく、吹錬中においても徐々にその振動方向が変化するので、加速度計を直角二方向に配置し両軸方向加速度成分をベクトル加算し、合成加速度を算出した。この測定法によりランスがいかなる方向に振動しても、その加速度の絶対値を得ることができる。

転炉の実操業で得られたランス振動加速度計からの出力波形を Fig. 5 に、また、これらの信号波形の周波数

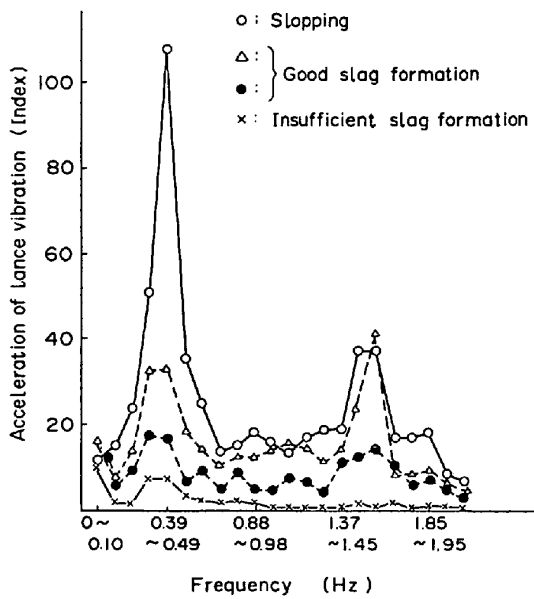


Fig. 6. Spectrum of lance vibration.

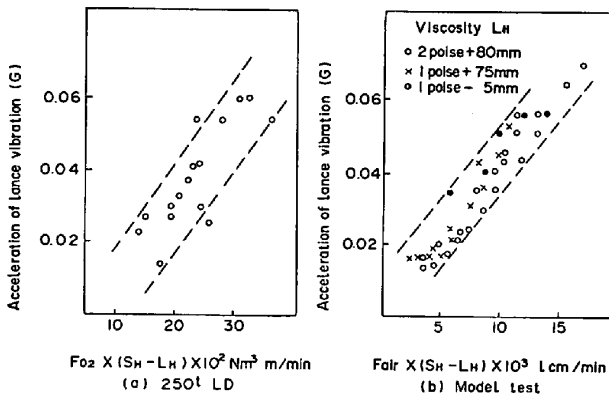


Fig. 7. Relation between acceleration of lance vibration and foaming slag height.

スペクトルを Fig. 6 に示す。周波数解析結果は、ランスの固有振動数の 0.39 Hz の近傍にピークを有し、またスラグフォーミング高さが高くなるにしたがつて、周波数に関係なくスペクトル強度が強くなることを示している。

一方、特別に製作した湯面測定用プローブを装着したサブランスを用いて、吹錬中間欠的にスラグフォーミング高さを測定し、ランス振動加速度との対応をとり解析した結果、Fig. 7(a) に示すように、送酸速度とランスのスラグ中への浸漬深さの積と、ランス振動加速度との間に(1)式で示される関係があることを見出した。

$$G = aF_{O_2}(S_H - L_H) + b \quad (1)$$

ただし G : ランス振動加速度 (G)

F_{O_2} : 送酸速度 (Nm³/min)

S_H : スラグフォーミング高さ (m)

L_H : ランス高さ (m)

a, b : 定数

(1)式は実験式であるが、各パラメータは次のように説明できる。すなわち(1)式中の $(S_H - L_H)$ はスラグ中に浸漬されたランスの長さを示し、スラグの運動エネルギーを受ける面積に比例する。また送酸速度 F_{O_2} は、脱炭反応により生じる CO ガス量すなわちスラグに与えられる運動エネルギーに相当する。

(1)式の妥当性を検証するために、250t 転炉の 1/10 模型を製作し、水モデル実験を行った。石けんの水溶液とポリエチレンオキシド (増粘剤) からなる発泡性液体を用い、実転炉と同じく 4 孔ランスから空気を噴射した。Fig. 7(b) にその実験結果を示したが、(1)式によくしたがうことが確認できた。

4.2 スラグフォーメーション制御技術

スラグフォーメーション制御は、スロッピングを防止し、スラグフォーミング高さを常に良好な高さに維持することを基本的なねらいとしている。吹錬は、プロセスコンピュータの指示によるプログラムにしたがつて進行するが、スラグフォーミング高さが適正域からずれた時、ランス高さまたは送酸速度を修正するものである。Fig. 8 にスラグフォーメーション制御システムの機器構成を示す。互いに水平直角方向のランス振動加速度成分 G_x, G_y が独立に測定され、ベクトル加算された合成加速度 G がプロセスコンピュータに入力される。一方(1)式における変数のランス高さ L_H および送酸速度 F_{O_2} は、時々刻々コンピュータに入力されるので、(1)式を変換した(2)式を用いてスラグフォーミング高さ S_H を求めることができる。

$$S_H = \frac{G - b}{aF_{O_2}} + L_H \quad (2)$$

実炉においては、炉底耐火物の溶損あるいはスラグの付着により炉底高さが変動するので、炉底高さ修正項を加えた(3)式をスラグフォーメーション制御プログラムに組み込んだ。

$$S_H = \frac{G - b}{aF_{O_2}} + L_H + B_H \quad (3)$$

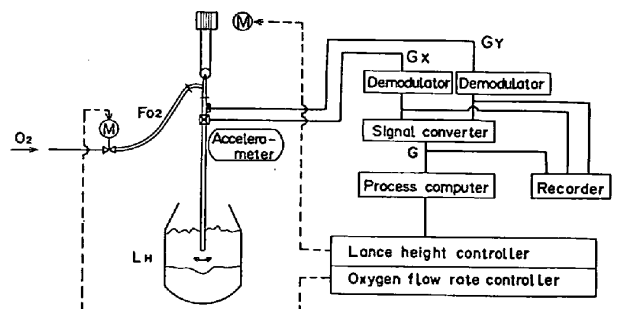


Fig. 8. System of slag formation control.

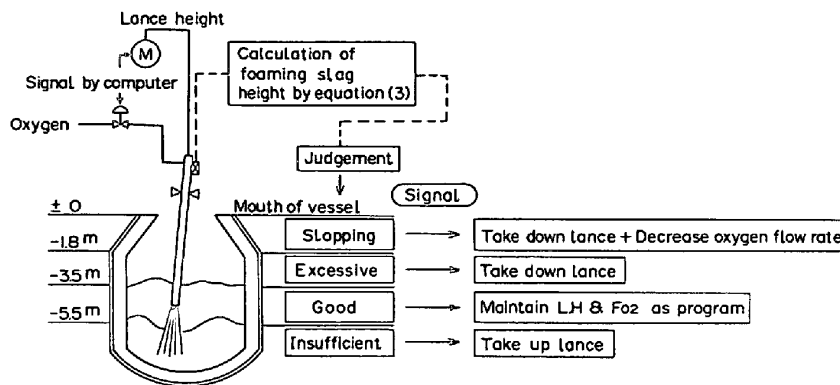


Fig. 9. Principle of slag formation control.

ただし B_H : 炉底高さ修正項

算出されたスラグフォーミング高さ S_H の値が, Fig. 9 のように4ランクからなるスラグフォーメーションランクのいずれに属するかを判定する. 各領域の境界となるスラグ高さは, 脱リン成績を評価指数として経験的に求めたが, スロッピング領域下限高さについてはサブランスを用いて実測して定めた.

判定が「Good」の場合は, プログラム通りの吹錬プログラムを継続し, その他の判定の場合はソフトブロー, あるいはハードブロー側に吹錬プログラムを修正し, その後「Good」判定になればもとの吹錬プログラムにもどすものである. スラグフォーメーション制御操作後の炉内反応の追従は, 数 10s の遅れをもっているので, Fig. 10 の制御ロジックの例に示したように一種の可変周期サンプリング制御を採用している. Fig. 11 に当所第2製鋼工場 250t 転炉において実施したスラグフォーメーション制御の実施例を示したが, 矢印の時点で調節操作が行われている.

4.3 スラグフォーミング高さ脱リン

スラグの物理的挙動であるスラグフォーミング現象

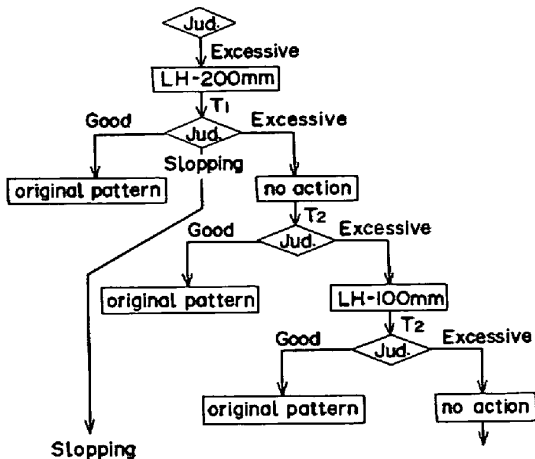


Fig. 10. Example of slag formation control program (When judgement is “excessive”).

が, 化学反応である脱リンを制御する指標であり得るか検証するために, 250t 転炉のスラグフォーミング高さ と吹き止めリン濃度の 関係 を 調査 した 結果 を Fig. 12 に示した. スラグフォーミング高さの時間累積値が高いほど, 脱リン反応が促進されており, 異常なスラグ塩基度でない限り, スラグフォーミング高さをスラグの脱リン能力を示す一つの指標として適用し得ることを確認した.

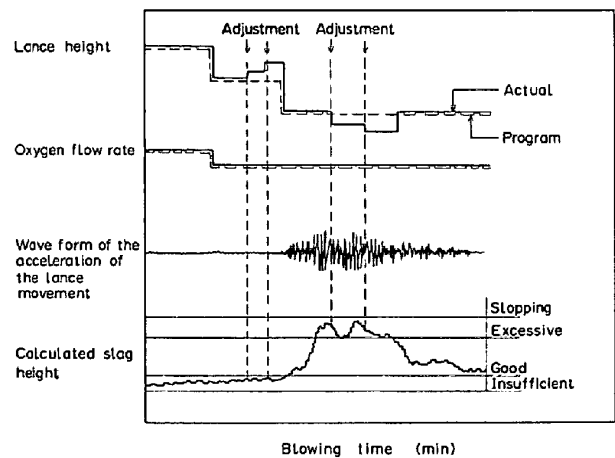


Fig. 11. Example of automatic blowing.

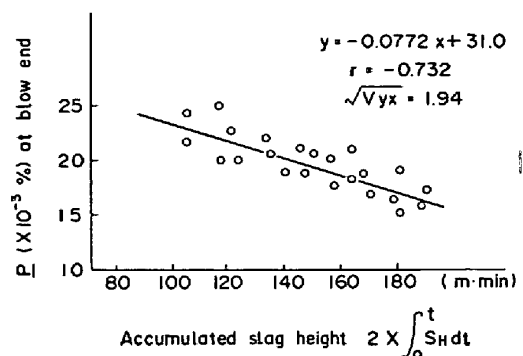


Fig. 12. Relation between foaming slag height and [P%] at blow end.

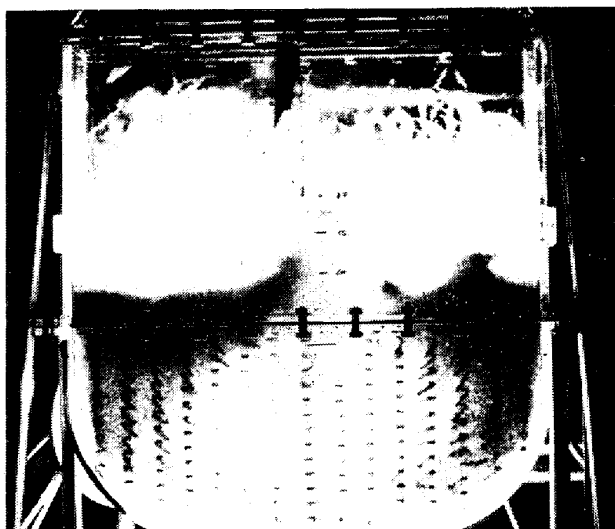


Photo. 1. Movement of slag and gas in 1/10 model test.

5. スラッグの揺動とランス振動に関する理論的考察

Photo. 1 に、石けん水溶液とポリエチレンオキサイドからなる発泡性液体を用いた 2 次元モデルによる実験の状況を示した。この写真ではランス先端が中心よりも左側に振れ、そのためガス吹き込み位置も左側に片寄っているが、ガスの液面からの離脱位置は中心より右側である。すなわち、ガスは上昇中に左から右へ移動している。このガスの水平方向運動は、微小な泡で構成されているスラッグの流動に起因するものであるが、逆にスラッグの流動の原動力は上昇するガスから与えられる。したがって、スラッグが何らかの原因によつて周期的な運動を行えば、上昇するガスもそれにつれて周期的に上昇径路を変えるので、スラッグの運動エネルギーが加わる位置も周期的に片寄る。

この関係を容器内の液体の振動の問題と考えると、周期的な外力が加わる場合の波動の方程式は、(4)式で表すことができる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + X_0 \cos(2\pi f_B t + 2\pi x / \lambda_B + \varepsilon_B) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし u : x 方向の流速 X_0 : 外力のピーク値
 C : 波の進行速度 f_B : 外力の振動数
 t : 時間 λ_B : 外力の波長
 x : 水平方向座標 ε_B : 位相遅れ

境界条件は、容器の幅を $2l$ として $x = \pm l$ のとき、 $u = 0$ とし、 $K = 2\pi f_B / C$ とおけば容器の中心軸上における水平方向のスラッグの流速は(5)式で与えられる。

$$u(t)_{x=0} = \left[\frac{16x_0 l^3 \lambda_B^2}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda_B}\right) \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(2r+1)(-1)^r}{(2r+1)^2 \lambda_B^2 - 16l^2} \cdot \frac{1}{4l^2 K^2 - (2r+1)^2 \pi^2} \right] \cos(2\pi f_B t + \varepsilon_B) \quad \dots\dots\dots (5)$$

液体は外力と同じ周期で振動し、その強さは $K = (2r + 1)\pi / 2l$ のとき、すなわち振動数が

$$f_B = (2r+1)C / 4l \quad (r=0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (6)$$

のとき著しく大きくなり共振現象をおこす。

共振をおこす最小の振動数

$$f_B = C / 4l \quad \dots\dots\dots (7)$$

は液体振動の固有振動数とみなせる。固有振動は容器の中心で最大振幅をとる定常波であり、その波長 λ は容器幅の 2 倍、すなわち

$$\lambda = 4l \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。深さ h の液体中における波長 λ の波の進行速度は(9)式で与えられる³⁾。

$$C = \left\{ \frac{g \lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \right\}^{1/2} \approx \sqrt{\frac{g \lambda}{2\pi}} \quad (\lambda < 4h \text{ のとき}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

(7)、(8)、(9)式より次式が与えられる。

$$f_B = \sqrt{\frac{g}{8\pi l}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10)式は、液体の深さが容器幅の 1/2 より大きいときの液体振動の固有振動数を与える。半径が 3.2 m の転炉内で高さ 3 m 以上にフォーミングしたスラッグの固有振動数は

$$f_B = \sqrt{9.8(8 \times \pi \times 3.2)} = 0.35 \text{ Hz}$$

である。

一方、振動数 f_B のスラッグ振動によつて引きおこされるランスの振動は(11)式で表される。

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + (2\pi f_l)^2 \theta = F \cos(2\pi f_B t) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし θ : ランスの振れ角度
 f_l : ランスの固有振動数
 F : 係数

(11)式の一般解は

$$\theta = A \cos(2\pi f_l t) + B \sin(2\pi f_l t) + \frac{F}{4\pi^2(f_l^2 - f_B^2)} \cos(2\pi f_B t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

であり、第 1 項および第 2 項はランスの自由振動を表し、第 3 項はスラッグによる強制振動を表す。第 3 項は f_l と f_B が近づくと無限大となり共振現象を生じることを示す。250 t 転炉でのランスの固有振動数を測定したところ 0.34~0.39 Hz 近傍にあり、(10)式で得られ

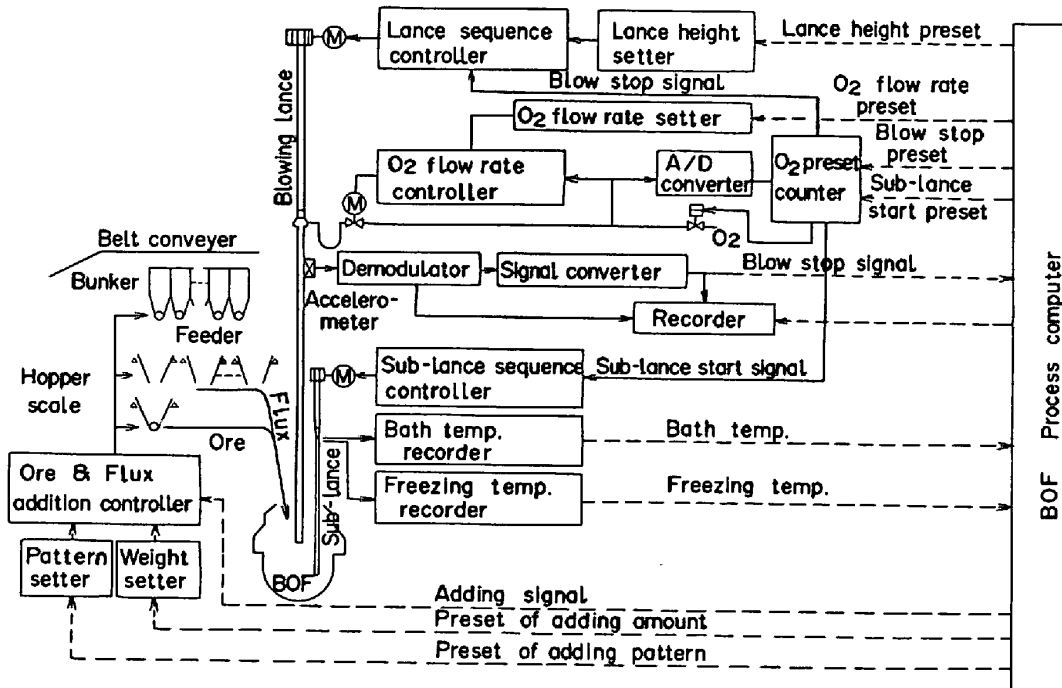


Fig. 13. Hardware of fully automatic blowing system.

た値に近く、かつ Fig. 6 に示したように操業時のランス振動スペクトルは 0.3~0.5 Hz 近傍にピークを有する。すなわち、スラグの固有振動数とランスの固有振動数が非常に近く、ランスがスラグの揺動を検出するセンサーとして優れていることがわかる。一方(11), (12)式中の F は、スラグがランスにおよぼす力に比例し、この力は流れの中におかれた円柱が受ける抗力とみなすことができ、(13)式がなりたつ。

$$F \propto DLC_D \frac{1}{2} \rho_s u^2 \dots \dots \dots (13)$$

ただし D : ランス径 L : ランス浸漬深さ
 C_D : 抵抗係数 u : スラグ流速
 ρ_s : フォーミングスラグの密度

抵抗係数 C_D はスラグの物性により変化するが、特に異常な塩基度でない限りほぼ一定値をとると考えてよい。スラグの揺動のエネルギーである $\frac{1}{2} \rho_s u^2$ は、上昇するガスから与えられる運動エネルギーの位置的な片寄りに関係するが、発生する CO ガス量が多いほど大きいと考えて差支えなく、最も簡単に送酸速度 F_{O_2} と比例関係にあると考えれば、 $L = (S_H - L_H)$ であるから実験式(1)が得られる。

6. 全自動吹錬制御システムのハードウェア構成

Fig. 13 に全自動吹錬制御システムのハードウェア構成を示した。吹錬プログラムを選択した後、吹錬を開始すれば、吹錬終了までの全操作が、Fig. 1 に示した④、

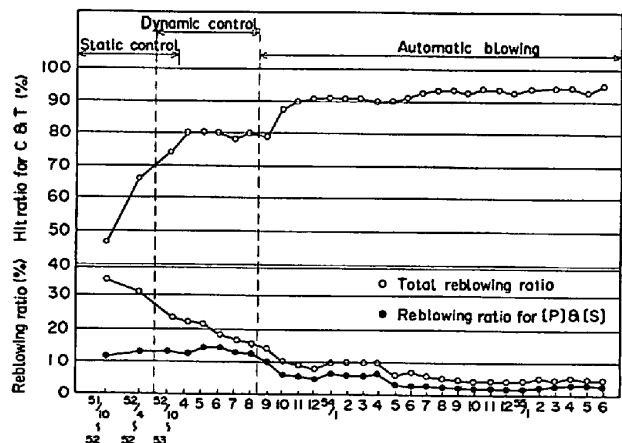


Fig. 14. Improvement of blowing results at No. 2 BOF.

⑤、⑥のサブシステムにしたがって、転炉プロセスコンピュータからプラント制御機器への直接出力によって行われる。吹錬中のランス振動の測定値は、連続的に同コンピュータに入力され、⑦のスラグフォーメーション制御サブシステムにもとづいて、ランス高さおよび送酸速度を修正しつつ吹錬を全自動にて進行させる。

7. 全自動吹錬結果

ランス振動測定によるスラグフォーメーション制御技術を用いた、全自動吹錬の成果を水島製鉄所第2製鋼工場を例にとつて述べる。Fig. 14 に吹錬成績の推移を示すが、吹き止め炭素含有量、温度同時的中率は 95% に

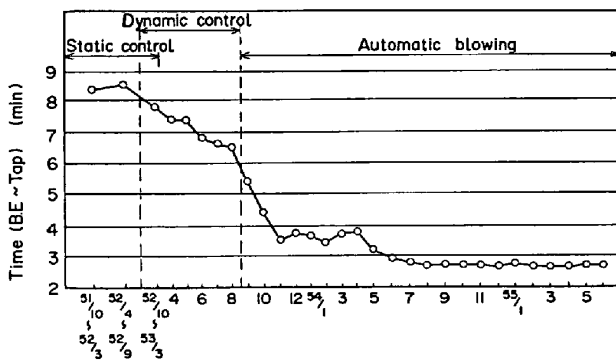


Fig. 15. Transition of the time between blow end and tapping.

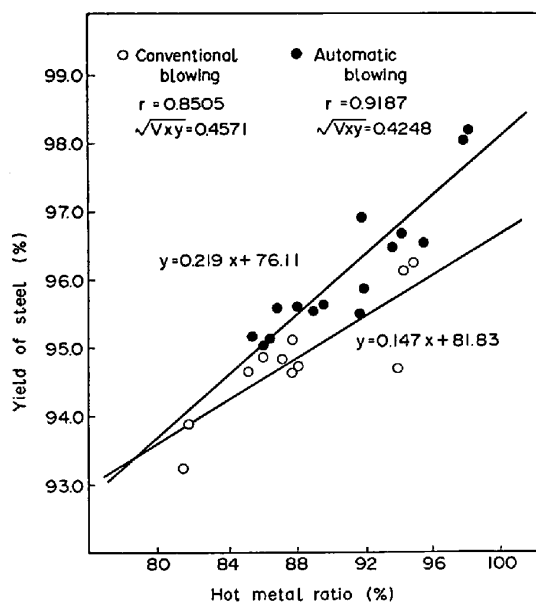


Fig. 16. Improvement of yield by automatic blowing (Low C rimmed steel).

達し、同時に再吹錬率は 6% と著しく低減した。このように再吹錬率が低下したことと、終点制御精度の向上により吹き止め結果を確認することなく吹き止め後直ちに出鋼する QDT (Quick and Direct Tapping) 操業が可能となった結果、吹き止め～出鋼所要時間は Fig. 15 のごとく大幅に短縮された。また歩留りについては、

Table 3. Effect of automatic blowing.

Simultaneous hit ratio for C & T at blow end		47% → 95%
Reblowing ratio	For (P)&(S)	15% → 35%
	Total	32% → 60%
Time (Blow end ~ Tapping)		8.5min → 2.5 min
Stopping ratio		29% → 5.4%
Yield of steel		+ 0.49%
Lime consumption		- 3 kg/t
Life of furnace		1,400heats → 2,100heats

スロッピングの低減、再吹錬の低減、吹き止め～出鋼所要時間の短縮による熱ロスの減少、および生石灰原単位の低減等により、Fig. 16 に示すように低炭リムド鋼を例にとると 0.5~1.0% の向上を果たした。これらの成果をまとめて Table 3 に示した。

8. 結 言

吹錬中のスラグフォーメーション状況を連続的に検知する技術は、炉体の振動、排ガス分析、音響等各種の測定法が試みられてきたが、ランス振動測定によるスラグフォーメーション制御技術の完成により、従来きわめて困難とされていた、複雑な鋼種構成の製鋼工場における転炉吹錬の自動化が可能となり、転炉吹錬技術は完成の域に達した⁵⁾⁶⁾。

文 献

- 1) 古茂田敬一, 川崎量一, 塩川信正, 羽田守幸: 川崎製鉄技報, 2 (1970), p. 3
- 2) 飯田義治, 江本寛治, 難波明彦, 武 英雄, 土田剛, 高橋英幸, 小川正勝, 中路 茂, 増田康男: 川崎製鉄技報, 10 (1978), p. 4
- 3) H. LAMB: Hydrodynamics, 2 (1981) [東京図書]
- 4) 機械工学便覧改訂第 6 版, (1977), p. 8 [日本機械学会]
- 5) 飯田義治, 江本寛治, 大西正之, 平山勝久, 小川正勝, 増田康男: 鉄と鋼, 65 (1979), S 203
- 6) 飯田義治, 江本寛治, 大西正之, 平山勝久, 小川正勝, 山田博右: 鉄と鋼, 65 (1979), S 204