

Fig. 3. Distribution of waiting time of the ladle.

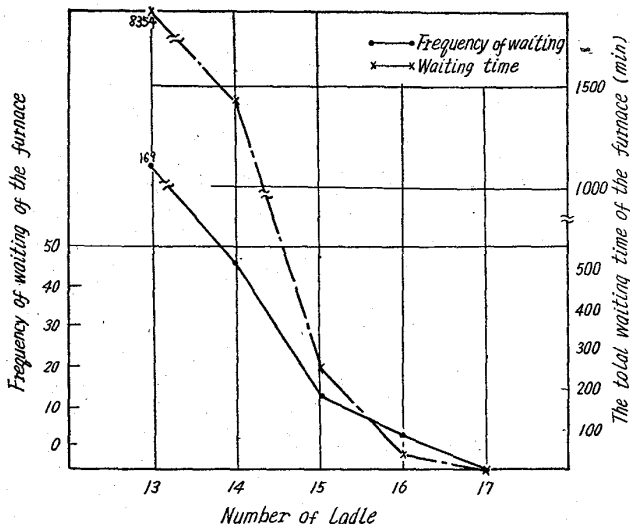


Fig. 4. The relation between times of waiting, total waiting time and number of ladle.

らの取鍋保有数と良く一致する。現在、待発生とコスト計算結果に基づいて、工場実験を行なっているが、今回の数値が妥当で再現性のあるものであることを確認した。

V. 結 言

1. 現在の生産量(6基稼働)でも、取鍋数は約20%減少できる。
2. シミュレーション結果と、それらを加味したコスト計算結果は良く一致した。
3. 平炉工場では、製鋼時間がバラツクことと、集中出鋼のために、5乃至6時間の待機時間が必要である。今回行なつたシミュレーションは工場経営に大きな寄与をもたらした。われわれの行なっている一連のシステムの標準化が進むにつれ、製鋼工場の管理形態は大きく前進するであろう。

文 献

- 1) 甲斐他: 鉄と鋼, 48 (1962) 11, p. 1321
- 2) 甲斐他: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 360

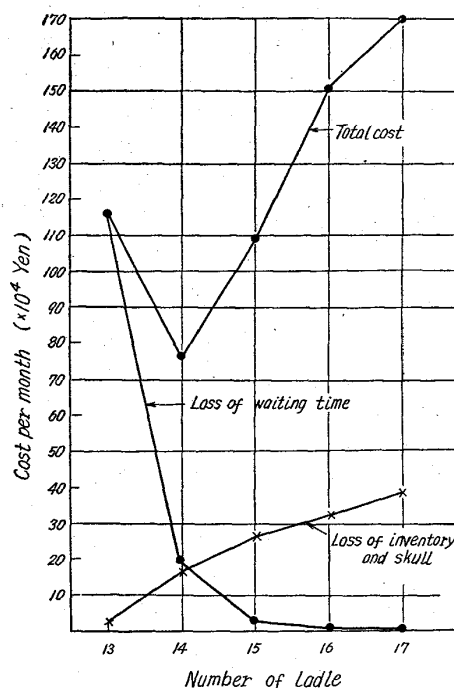


Fig. 5. The relation between the number of ladle and cost accounting.

(87) シェーキングレードルの力学的シミュレーション

八幡製鉄所, 技術研究所

理博 吉田 秋登・島田 道彦
石橋 行衛・○有吉 敏彦

The Dynamic Simulation of Shaking Ladle.

Dr. Akito, YOSHIDA, Michihiko SHIMADA, Masae ISHIBASHI and Toshihiko AKIYOSHI.

I. 緒 言

溶銑の炉外脱流を目的に開発されたシェーキングレードルについては、いまや実施の段階に入り、脱硫試験結果も報告されているが、いずれも実用化に際して必要な力学的考察が十分でない。

シェーキングレードルのような偏心回転運動を行なう円筒容器中の液体の運動は回転数が低い間は静かで、内部の混合攪拌もほとんど行なわれない。回転数の増加に伴ない液面の上下も大きくなり、ある回転数に近づくと液面は不安定となつて上下運動も激しくなる。この現象はブレイクと呼ばれ混合攪拌も強くなるので、シェーキングレードルではこれを利用して溶銑と脱硫剤を混合し、接触を促進して脱硫効果をあげている。

実用化においては、設計上処理能力に対するブレイクの起る回転数、波高、さらに力率を知る必要があるが、われわれは模型実験によりこれらを解析し、無次元表示できたのでここに報告する。

II. 次元解析

シェーキングレードルの目的は容器内部の混合攪拌であるが、この効果を流体の自由表面の変動に代表させ得るものとする。接動によつて生ずる波の高さに関するいろいろな量を考え、これらの寄与する度合を知れば、シェーキングレードルの特性を知る目安となろう。波高 Δ に関する量として入力 P 、粘性係数 μ 、容器の径 D 、流体の深さ H 、偏心 d 、回転数 N 、流体の密度 ρ 、重力の加速度 g 、表面張力 T を考え次元解析すると、

$$\Delta/D = f\{P/D^5\rho N^3, H/D, d/D, ND^2/v, T/\rho N^2D^3, N^2D/g\}$$

の関係が得られる。

$H/D, d/D$ は幾何学的相似を表す量であり、 $ND^2/v, T/\rho N^2D^3$ はそれぞれレイノルズ数、ウェーバ数として知られているものである。

N^2D/g は回転数のパラメータである。円筒容器内の完全流体の重力波の方程式、ポテンシャル ϕ を用いた連続の式

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0$$

および自由表面の境界条件、

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0$$

を解いて得られた結果、

$$\phi = \Delta\lambda P (\cosh z/\lambda / \sin H/\lambda) \cos(Pt - \theta) J_1(r/\lambda)$$

$$\lambda = D/3.682$$

および、固有値 $P^2 = (g/\lambda)\tanh(H/\lambda)$ を用いると、固有回転数 N_0 、

$$N_0 = 57.36\sqrt{\tanh(3.682H/D)/\sqrt{D}} \text{ r. p. m}$$

D ; meter

が得られる。よつてパラメータ N^2D/g は固有回転数との比 $(N/N_0)^2$ または角速度の比 $(\omega/P)^2$ に置換えられる。

III. 力学モデル

容器内の流体の細部の動きは無視して、流体の重心に着目して解析する。重心が x だけ容器の中心より偏るとき、重心に働く中心方向の力を $f = hx$ 、容器の偏心を d

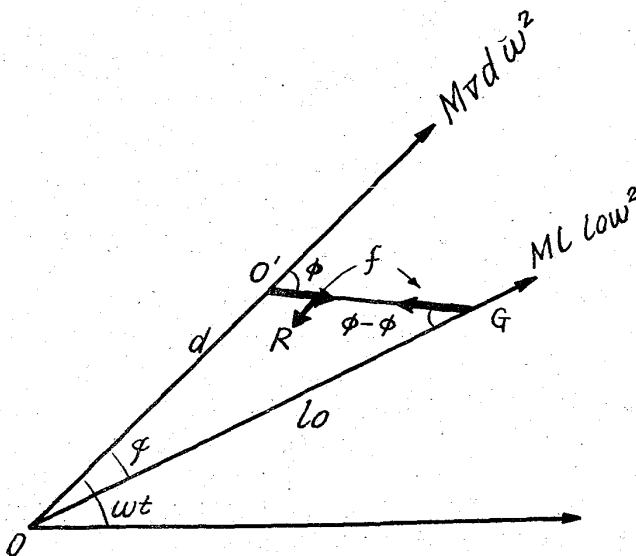


Fig. 1. Equilibrium of force acting ladle.

これを回転するに要するモーメントを M 、流体の質量を $M_e l_0$ 、容器の質量を Mv とする。Fig. 1 に示すように、トルクを伝達するクランク軸を O 、容器の中心を O' とし、 O, O' が基準線となす角を θ 、重心の O, O' に対する位相遅れを φ とすると力の釣合は図のようになる。すなわち、重心 G に達心力 $M_e l_0 \omega^2$ 、容器の中心 O' に $M_v d \theta'^2$ と流体の抵抗による回転モーメント R が働く、よつて点 G の釣合は、

$$f = kx = M_e l_0 \omega^2 \cos(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (1)$$

$$R = M_e l_0 x \omega^2 \sin(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (2)$$

O に働く回転モーメント M は、

$$M = f d \sin \varphi = M_e l_0 d \omega^2 \cos(\varphi - \psi) \sin \varphi \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで $\theta' = \omega = \text{const}$ とした。正弦法則、

$$l_0 / \sin \varphi = x / \sin \psi = d / \sin(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (4)$$

を用いると上式は、

$$x = d \sin \psi / \sin(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (5)$$

$$f = M_e d \omega^2 \sin \varphi \cot(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (6)$$

$$R = M_e d^2 \omega^2 \sin \varphi \sin \psi / \sin(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (7)$$

$$M = M_e d^2 \omega^2 \sin \varphi \cot(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (8)$$

となる。

波高 Δ と重心の偏り x の間の関係は先に求めた完全流体の解析を用いると、

$$\Delta = 6.791 (H/D) x$$

となる。またこの理想化された場合では、Fig. 1 の φ 、 R は零となるから、

$$f = kx = M_e (d+x) \omega^2$$

$$\therefore x = M_e d \omega^2 / (k - M_e \omega^2)$$

$\omega \rightarrow P$ の時 $x \rightarrow \infty$ となるために、

$$k = M_e P^2$$

$$f = M_e P^2 x$$

が必要となる。今波高の無次元表示 $\xi = x/d$ を用いると、

$$\xi = (\omega/P)^2 / (1 - (\omega/P)^2)$$

が完全流体について成立つ。以上の結果を粘性を有する一般の場合にも適用すると、(5)、(6) より、

$$\xi = \sin \psi / \sin(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (5')$$

$$\xi = (\omega/P)^2 \sin \varphi \cot(\varphi - \psi) \dots\dots\dots (6')$$

の連立方程式が得られる。これより $\xi, (\omega/P)^2$ が与えられると φ, ψ が決まり (8) より所要モーメントが求められる。Fig. 2 に (5'), (6') の解を示す。

また、

$$m = \sin^2 \varphi \cos(\varphi - \psi) = \frac{M}{M_e d^2 \omega^2} = \frac{P}{M_e d^2 \omega^3}$$

$$\dots\dots\dots (9)$$

と置くと、これは先に次元解析で求めたパラメータ、 $P/D^5\rho N^3$ の $\rho D^5 N^3$ を $\pi/4\rho D^2 H d^2 \omega^3$ に置き換えたものに相当する。 P を watt, M_e を ton, d を mm, N を毎分当りの回転数で表わすと、

$$m = 8.72 (P/M_e d N^3) \times 10^5 \dots\dots\dots (9')$$

で与えられる。

IV. 実験結果と考察

シェーキングレードルを運転して、波の高さをコントロールするためにわれわれが制御できる量は、偏心量は前以つて調節できるとしても、回転数と回転力しかない。しかし実験によれば回転数を固定するとそれに応じ

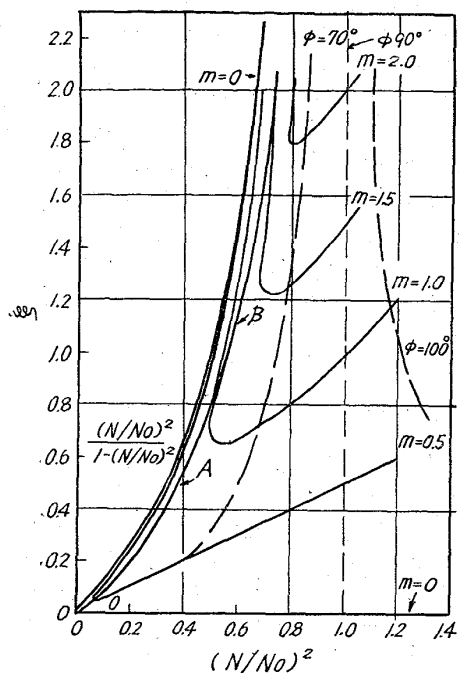


Fig. 2. $\xi (N/N_0)^2 \leftrightarrow m, \phi$ Chart.

た内部の流体摩擦によつて抵抗を生じ、波高と所要トルクは一義的に決定される。したがつて波高をコントロールできる制御量は容器軸の回転数のみとなる。

模型実験で回転数に対する波高および所要トルクを測定したが、これは本質的には流体の摩擦の影響を調べているわけである。Fig. 2 の $\xi, (N/N_0)^2 \leftrightarrow m \cdot \phi$ のチャートで回転数のパラメータ $(N/N_0)^2$ が増加するにしたがつて ξ は増加し曲線 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow$ を描く。これは常に $m=0$ に相当する曲線 $\xi = (\omega/P)^2 / (1 - (\omega/P)^2)$ より下にあり、 $(N/N_0)^2$ が 1 を起えると飽和する。この曲線は流体の摩擦抵抗によつて決まるものであり、Fig. 3 に示すように、流体が深いほど (H/D t), また径の小さいほど (レイノルズ数小) 低くなる。このようにして ξ が $(N/N_0)^2$ に対して決まればチャートより m, ϕ が決まり、逆にトルクが与えられると波高が導かれる。

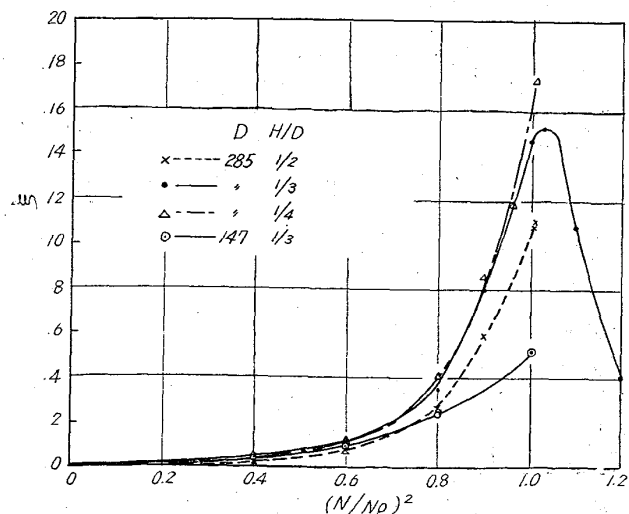


Fig. 3. Relation between wave height and revolution speed, eccentricity small.

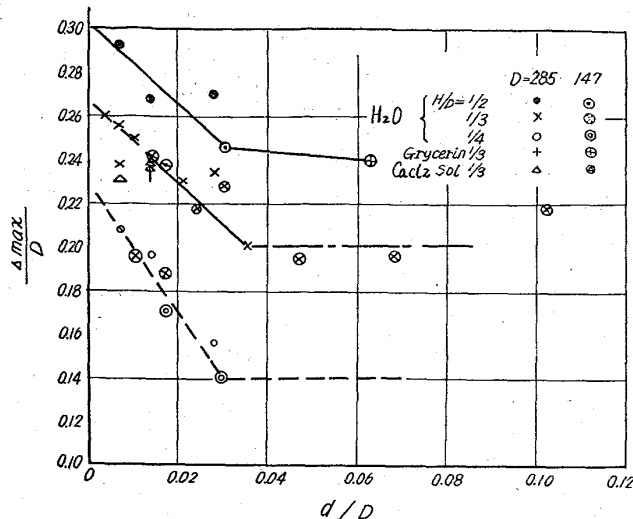


Fig. 4. Relation between relative wave height and eccentricity.

波高 Δ は偏心に比例し回転数の増加とともに高くなるが、最高値は Fig. 4 に示すように偏心とともに減少する傾向にある。よつて ξ は偏心が大きいくほど低い回転数で、低い値に飽和し、回転数の低い範囲 $(N/N_0)^2 < 0.7$ では偏心の影響は認められない。

回転数が固有回転数 N_0 を超えると、 ξ は飽和し、なだらかに減少するが表面の運動、攪拌は激しくなる。この状態をブレイク (Break) という。しかし偏心が小さいと $[d/D < 0.005]$ この状態は不安定で ξ は $(\omega/P)^2 / (1 - (\omega/P)^2)$ よりも小さな値に落ちく。また偏心比 d/D が 0.03 より大きいと、波高は回転数が N_0 より低い値で最大値を取る傾向にある。

写真によつて位相遅れ ϕ を測定したところ、ブレイクの起らない回転数の低い範囲では、 $0^\circ < \phi < 90^\circ$ となりモデルは満足されているが、ブレイクになると位相遅れはなくなり流体は遠心力によつて内壁に押しつけられた状態になる。 ξ, m 間の対応は意味を持たなくなる。

トルクの測定にはストレングージを用い、cgs 単位系を用いて整理した。

測定されたトルクより、9 式、

$$m = M/M_e d^2 \omega^2$$

を用いて、係数を m 算出し、 $(N/N_0)^2$ についてプロットすると、これは $(N/N_0)^2$ の二次曲線となつていゝ。よつて、

$$m = a(N/N_0)^4$$

と置いて最小二乗法により a を求め、偏心率との関係を深さ別に示したものが Fig. 5 である。所要入力 P を watt, 溶銑重量 W を ton, 偏心量 d を mm, 回転数 N を r.p.m で表わすと、所要入力は、

$$P = 1.15 \times 10^{-6} a (N/N_0)^4 W d^2 N^3$$

で与えられる。

実例について計算すると $a = 0.080$ が得られた。これは偏心深さなどを考慮すれば、実験結果とほぼ一致するものである。

V. 結 言

以上の結果を要約すると次のようになる。

1. 固有回転数は、

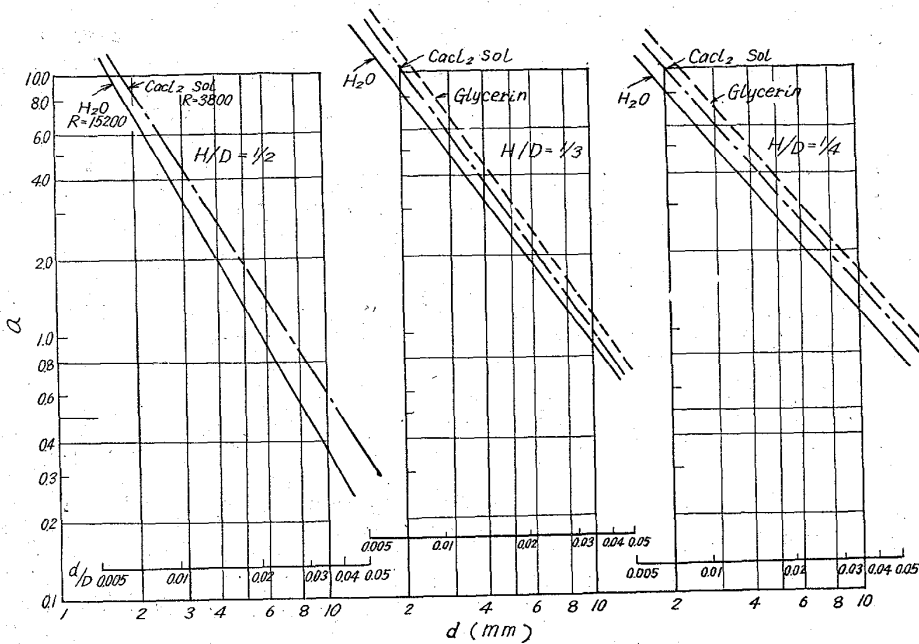


Fig. 5. Relation between [a] and eccentricity.

$N_0 = 57 \cdot 36 \sqrt{\tanh(3 \cdot 682 H/D) / \sqrt{D}}$ D; meter
 で与えられる。許容偏差は偏心とともに増加する。

2. 回転数が小さくブレークの起らない範囲では波高は流体の深さとともに増加し、かつ偏心に比例する。
3. ブレークの起つた場合の波高は流体の深さとともに増加し、偏心の増加に対しては減少する傾向にある。
4. 所要力率は回転数の7乗、内径の2乗、流体の質量に比例し、偏心にほぼ比例する。

実験を通じて感じたことは偏心があまり小さいと、 $[d/D < 0.005]$ ブレークの状態が不安定になり、ほぼ完全な質点振動系の状態を示し攪拌はよくなり。また偏心が大きいと攪拌は十分であるが必要力率が大きく、 d/D は $0.005 \sim 0.03$ の範囲が適当と思われる。攪拌を強くするには回転数をブレークの始まる速度から、 $(N/N_0)^2$ が 1.3 程度になるまで加速させてやるとよい。

(88) 炉内および取鍋内鋼浴の温度分布について

(鋼浴温度の連続測定について—V)

日本製鋼所、室蘭製作所

工博 荒木田 豊・○平岡 昇・古沢正義

On the Temperature Distribution of Steel Bath in Furnaces and Ladles.

(On the continuous immersion pyrometry of molten steel—V)

Dr. Yutaka ARAKIDA, Noboru HIRAOKA
 and Masayoshi FURUSAWA.

I. 緒 言

電気炉および平炉内鋼浴の温度むらについては多数の報告がある¹⁾。しかしながら取鍋内鋼浴の温度分布についての報告は見当らないようである。筆者らは取鍋内鋼

浴および鋳込流の浸漬测温を行なっているが²⁾、その測定値を評価するためには取鍋内鋼浴の温度分布を正確に把握しておく必要がある。そこで取鍋用の迅速浸漬测温装置³⁾を利用して取鍋内鋼浴の温度分布を測定した。またこれに関連して炉内鋼浴の温度分布を測定し、一方内張煉瓦の熱吸収による溶鋼の温度降下に対して簡単な熱伝導計算を行なつたところ興味ある結果を得たので報告する。

II. 炉内鋼浴の温度分布

調査の対象には炉内鋼浴の温度むらが最大であると考えられる 80 t 電気炉⁴⁾ および最小であるとみなされる 75 t 酸性平炉を選んだ。測定装置は Fig. 1 に示すように現行の炉内迅速浸漬测温装置に修正を加えたも

のとした。曲りの部分を鋼滓面に合わせるように浸漬して所定の深さの点を测温できるようにした。測定位置は電気炉では炉中央部で鋼滓面から 200, 400, 560, 760 mm の4点、平炉では3枚の装入扉前で鋼滓面から各 200, 400 mm の6点とした。なお通常作業の測定点は電気炉では炉中央部で深さ 200 mm の点であり、平炉では中央扉前の深さ 200 mm の点である。測定時期は電気炉では溶落、排滓前、差物前、出鋼前とし、平炉では溶落、鉍石前、石灰前、差物前、出鋼前とした。

測定値の整理方法にはいろいろのものが考えられるが、本報では通常測定点の温度からどの程度の温度差を有している部分があるかということに重点をおいて、通常測定位置の温度とこれから最も数値が離れている点の温度との差をその時の温度むらとし、これを、各炉、各時期ごとに整理してその平均値と標準偏差を求めた。その結果を Table 1 に示す。除滓前を除き電気炉の温度むらは酸性平炉のそれに比してはるかに大である。これは両者の精錬法の相違によるものであろう。

III. 取鍋内鋼浴の温度分布

取鍋内鋼浴の迅速浸漬测温を行なう際に⁴⁾、通常の測定後取鍋を所定の距離だけ下げ(測定点は相対的に上昇)十分な応答時間を与えた後にまた取鍋を下げる。これを反復することにより垂直方向の温度分布を求める。また同時に2本の熱電対を浸漬して水平方向の温度差につい

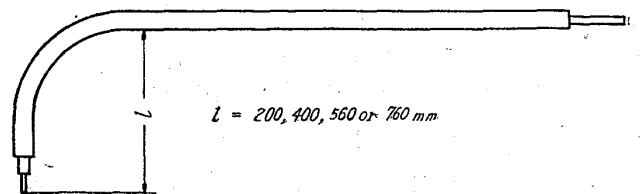


Fig. 1. Equipment used for measurement of temperature distribution of steel bath in furnaces.